



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TL 141584

PENGARUH PENAMBAHAN Al_2O_3 TERHADAP SIFAT LISTRIK DAN TERMAL $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL TERMOELEKTRIK

ILHAM RAMADHAN PUTRA
NRP. 2713 100 097

Dosen Pembimbing
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PENGARUH PENAMBAHAN Al_2O_3
TERHADAP SIFAT LISTRIK DAN TERMAL
 $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL
TERMOELEKTRIK**

ILHAM RAMADHAN PUTRA
NRP. 2713 100 097

Dosen Pembimbing
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

THE EFFECTS OF Al_2O_3 ADDITION ON ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ AS THE CANDIDATE OF THERMOELECTRIC MATERIALS

ILHAM RAMADHAN PUTRA
NRP. 2713 100 097

Advisors

Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL
ENGINEERING

Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH PENAMBAHAN Al_2O_3 TERHADAP
SIFAT LISTRIK DAN TERMAL $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ SEBAGAI
KANDIDAT MATERIAL TERMOELEKTRIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ILHAM RAMADHAN PUTRA
NRP. 2713 100 097

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.  (Pembimbing I)

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.  (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH PENAMBAHAN Al_2O_3 TERHADAP SIFAT LISTRIK DAN TERMAL $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL TERMOELEKTRIK

Nama Mahasiswa : Ilham Ramadhan Putra
NRP : 2713100097
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstrak

Material termoelektrik merupakan material yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi panas akibat perbedaan temperatur menjadi energi listrik dan sebaliknya. Salah satu jenis material yang menunjukkan sifat termoelektrik adalah material seng oksida (ZnO) yang didoping dengan aluminium (Al). Pada penelitian ini dilakukan proses sintesis material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ dengan fokus pada variasi komposisi penambahan Al_2O_3 . Material Al_2O_3 yang digunakan sebagai sumber doping adalah sebesar 0; 1; 2; 3; dan 4 atomic %. Penelitian ini dilakukan dengan metode kopresipitasi. Pengujian yang dilakukan untuk menganalisis sifat listrik dan termal dari material hasil sintesis diantaranya adalah menggunakan X-ray Diffractometer, Scanning Electron Microscopy (SEM-EDX), Differential Scanning Calorimetry-Thermogravimetric Analysis (DSC-TGA), dan LCR meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai konduktivitas listrik secara umum meningkat dengan penambahan jumlah doping dan mencapai hasil maksimum pada nilai doping sebesar 2 at.%. Sementara, ketahanan termal dari material secara umum stabil dengan peningkatan temperatur hingga 900°C . Material hasil sintesis dapat dijadikan sebagai kandidat material termoelektrik untuk aplikasi pada temperatur tinggi.

Kata kunci: termoelektrik, ZnO , Al_2O_3 , doping, kopresipitasi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

THE EFFECTS OF Al_2O_3 ADDITION ON ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES OF $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ AS THE CANDIDATE OF THERMOELECTRIC MATERIALS

Name : Ilham Ramadhan Putra
NRP : 2713100097
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisors : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.
Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si.

Abstract

Thermoelectric material is a material that has the ability to convert heat energy due to temperature differences into electrical energy and vice versa. One type of material that shows the nature of the thermoelectric properties is zinc oxide (ZnO) which doped by aluminum (Al). In this research, the synthesis of $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ focused on the variation of Al_2O_3 addition. Material Al_2O_3 is used as doping resource with the value of 0; 1; 2; 3; and 4 in atomic %. This research use the co-precipitation method. The tests were conducted to analyze the electrical and thermal properties used X-ray Diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDX), Differential Scanning Calorimetry-Thermogravimetric Analysis (DSC-TGA), and LCR meter. The results of research obtained that the value of the electrical conductivity generally increases with increasing the number of doping and achieve maximum results in doping value of 2 at.%. Meanwhile, the thermal stability properties of the material in general is stable with the increasing of temperature until 900°C . The product can be used as the candidate of thermoelectric materials of applications in high temperatures.

Keywords: *thermoelectric, ZnO, Al_2O_3 , doping, co-precipitation*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT karena limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul “Pengaruh Penambahan Al_2O_3 terhadap Sifat Listrik dan Termal $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ sebagai Kandidat Material Termoelektrik” dengan baik.

Laporan Tugas Akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi persyaratan studi serta untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat, karunia, kemudahan, dan kelancaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ayah, Ibu, adik, serta keluarga besar atas doa, dukungan, dan pengertian yang diberikan selama ini.
3. Ibu Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. dan Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan saran, masukan, bimbingan, dukungan, dan motivasi kepada penulis.
4. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama berkuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
5. Ibu Dian Mughni F., S.T., M.Sc., selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi.
6. Tim Penguji seminar dan sidang Tugas Akhir yang telah memberikan masukan serta saran yang mendukung untuk Tugas Akhir ini.

7. Seluruh dosen dan civitas akademik Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS, yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat serta pengalaman berharga selama berkuliah di jurusan ini.
8. Seluruh pihak yang telah mendukung dan membantu dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari, bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu saran dan kritik yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan.

Surabaya, 17 Januari 2017

Ilham Ramadhan Putra

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN.....iv

ABSTRAK.....vii

ABSTRACTix

KATA PENGANTARxi

DAFTAR ISI.....xiii

DAFTAR GAMBAR.....xvii

DAFTAR TABEL.....xxi

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....1

1.2. Rumusan Masalah.....3

1.3. Batasan Masalah3

1.4. Tujuan Penelitian3

1.5. Manfaat Penelitian4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Termoelektrik5

2.1.1. Efek Seebeck, Peltier, dan Thomson.....5

2.1.2. Aplikasi Material Termoelektrik.....9

2.2. Material Termoelektrik.....9

2.2.1. Material Semikonduktor Seng Oksida (ZnO)10

2.2.2. Material Al_2O_3 sebagai Sumber *Dopant*13

2.3. *Defect* pada Material Keramik.....16

2.4. Kopresipitasi19

| | |
|------------------|----|
| 5.2. Saran | 81 |
|------------------|----|

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

UCAPAN TERIMA KASIH

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|---------------------|---|----|
| Gambar 2.1. | Skema Ilustrasi dari Pembangkit Tenaga Termoelektrik..... | 6 |
| Gambar 2.2. | Penggambaran <i>Stick-and-Ball</i> dari Struktur Kristal Seng Oksida. | 11 |
| Gambar 2.3. | Struktur <i>Wurtzite</i> dari ZnO. | 12 |
| Gambar 2.4. | Struktur <i>Corundum</i> pada α -Al ₂ O ₃ | 15 |
| Gambar 2.5. | Sistem <i>Binary</i> dari Al ₂ O ₃ - ZnO..... | 15 |
| Gambar 2.6. | <i>Schottky Defect</i> | 17 |
| Gambar 2.7. | <i>Frenkel Defect</i> | 18 |
| Gambar 2.8. | Hasil <i>SEM</i> dari Material Al ₂ O ₃ yang Ditambahkan pada ZnO | 21 |
| Gambar 2.9. | Gambar <i>SEM</i> dari ZnO <i>Sintered Body</i> | 22 |
| Gambar 2.10. | Mikrografi <i>SEM</i> dari Serbuk AZO..... | 23 |
| Gambar 2.11. | Gambar FESEM dari ZnO | 25 |
| Gambar 2.12. | Nilai Resistivitas Serbuk <i>xAl-doped</i> | 26 |
| Gambar 2.13. | Morfologi dari <i>Al-doped</i> ZnO. | 26 |
| Gambar 3.1. | Seng Oksida (ZnO) | 29 |
| Gambar 3.2. | Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃)..... | 30 |
| Gambar 3.3. | Larutan Asam Klorida (HCl) | 31 |
| Gambar 3.4. | Larutan Ammonium Hidroksida (NH ₄ OH).... | 32 |
| Gambar 3.5. | Aquades..... | 33 |
| Gambar 3.6. | Neraca Digital | 33 |
| Gambar 3.7. | <i>Magnetic Stirrer</i> dengan <i>Hot Plate</i> | 34 |
| Gambar 3.8. | <i>Carbolite Tube Furnace</i> | 35 |
| Gambar 3.9. | Diagram Alir Penelitian. | 37 |
| Gambar 3.10. | Mesin <i>X-Ray Diffractometer</i> | 41 |
| Gambar 3.11. | Mesin <i>Scanning Electron Microscopy</i> dan <i>EDX (SEM-EDX)</i> | 42 |
| Gambar 3.12. | <i>LCR Meter</i> | 43 |
| Gambar 3.13. | Alat <i>DSC-TGA</i> | 44 |
| Gambar 4.1. | Larutan ZnCl ₂ | 45 |
| Gambar 4.2. | Larutan hasil penambahan NH ₄ OH..... | 46 |
| Gambar 4.3. | Serbuk ZnO Tanpa <i>Doping</i> | 46 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Gambar 4.4. | Larutan ZnO dengan <i>Doping</i> | 47 |
| Gambar 4.5. | Pengamatan Visual Serbuk ZnO dengan Penambahan Al ₂ O ₃ | 48 |
| Gambar 4.6. | Hasil Pengujian <i>XRD</i> untuk Masing-Masing Sampel. | 50 |
| Gambar 4.7. | Hasil <i>XRD</i> Sampel dengan <i>Doping</i> 4% | 52 |
| Gambar 4.8. | Pergeseran Nilai <i>Peak</i> untuk Puncak Tertinggi pada Bidang (101). | 53 |
| Gambar 4.9. | Morfologi dari Serbuk <i>Al-doped</i> ZnO pada Perbesaran 5000x dengan <i>Doping</i> | 60 |
| Gambar 4.10. | Morfologi dan Ukuran Partikel dari Serbuk ZnO tanpa <i>Doping</i> | 61 |
| Gambar 4.11. | Hasil <i>SEM</i> dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 1% | 63 |
| Gambar 4.12. | Hasil <i>EDX</i> dari serbuk ZnO dengan <i>doping</i> 1% | 64 |
| Gambar 4.13. | Hasil <i>SEM</i> dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 2% | 65 |
| Gambar 4.14. | Hasil <i>EDX</i> dari serbuk ZnO dengan <i>doping</i> 2% | 66 |
| Gambar 4.15. | Hasil <i>SEM</i> dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 3% | 67 |
| Gambar 4.16. | Hasil <i>EDX</i> dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 3% | 68 |
| Gambar 4.17. | Hasil <i>SEM</i> dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 4% | 69 |
| Gambar 4.18. | Hasil <i>EDX</i> dari Serbuk ZnO dengan <i>Doping</i> 4% | 70 |
| Gambar 4.19. | Sampel yang telah dikompaksi dan dilapisi <i>silver paste</i> | 71 |
| Gambar 4.20. | Grafik Konduktivitas Listrik terhadap Frekuensi | 72 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Gambar 4.21. | Persentase Massa untuk Masing-Masing Sampel pada Temperatur Kamar hingga 900° C | 76 |
| Gambar 4.22. | Kurva <i>DTG</i> Serbuk ZnO Tanpa <i>Doping</i> | 77 |
| Gambar 4.23. | Kurva <i>DTG</i> sampel dengan <i>doping</i> 1%. | 77 |
| Gambar 4.24. | Kurva <i>DTG</i> sampel dengan <i>doping</i> 2%. | 78 |
| Gambar 4.25. | Kurva <i>DTG</i> sampel dengan <i>doping</i> 3%. | 78 |
| Gambar 4.26. | Kurva <i>DTG</i> sampel dengan <i>doping</i> 4%. | 78 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1. Sifat Fisik dari ZnO | 11 |
| Tabel 2.2. Sifat Fisik Al ₂ O ₃ | 14 |
| Tabel 3.1. Karakteristik Umum Serbuk ZnO..... | 29 |
| Tabel 3.2. Karakteristik Serbuk <i>Aluminium Oxide</i> (Al ₂ O ₃) | 30 |
| Tabel 3.3. Karakteristik Larutan Asam Klorida (HCl). | 31 |
| Tabel 3.4. Karakteristik Larutan Amonium Hidroksida. | 32 |
| Tabel 3.5. Spesifikasi Neraca Digital. | 34 |
| Tabel 3.6. Perancangan Penelitian..... | 38 |
| Tabel 4.1. Sampel yang Diuji | 49 |
| Tabel 4.2. Nilai <i>Crystallite Size</i> untuk Setiap Sampel pada <i>Peak</i> (101)..... | 55 |
| Tabel 4.3. Nilai <i>Microstrain</i> pada Bidang (101) | 56 |
| Tabel 4.4. Nilai <i>a</i> dan <i>c</i> untuk <i>Lattice Parameters</i> | 57 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemampuan termoelektrik (*thermoelectricity*) merupakan suatu kemampuan yang dimiliki material yang mana memiliki pengertian sebagai dua mekanisme. Mekanisme pertama adalah kemampuan untuk melakukan proses konversi perbedaan temperatur yang terjadi pada kedua sisinya ataupun perbedaan temperatur pada dua jenis material yang berbeda, untuk menghasilkan listrik. Kemudian yang kedua adalah kemampuan suatu material yang mana ketika diberikan arus listrik akan menimbulkan perbedaan temperatur pada kedua sisinya sehingga menghasilkan panas atau dingin tanpa adanya pembakaran maupun gerakan. Beberapa dekade terakhir, penelitian mengenai material yang digunakan untuk aplikasi pengonversian energi menggunakan efek termoelektrik terus berkembang. Berbagai material seperti paduan Si-Ge, logam transisi disilikat, dan beberapa senyawa Boron telah dikembangkan untuk pembangkit energi termoelektrik pada temperatur tinggi. Namun, penggunaan material-material tersebut secara praktik sangat terbatas karena diperlukan proses perlindungan permukaan yang membutuhkan biaya besar untuk mencegah terjadinya oksidasi dan penguapan (Tsubota T., et al. 1997).

Keunggulan material oksida untuk bertahan dalam kondisi udara bebas dan temperatur tinggi menjadikan material ini dilirik sebagai kandidat material termoelektrik terutama untuk aplikasinya dalam kondisi temperatur tinggi. Selain itu, ada banyak jenis material oksida yang memiliki konduktivitas listrik yang baik. Parameter-parameter seperti konduktivitas listrik dan panas dalam suatu material dapat dikontrol dengan berbagai macam strategi seperti *doping* (Pei, et al. 2012), *nanostructuring*, atau *nanocomposites* (Liu & Qin, 2012).

Seng oksida (ZnO) adalah salah satu material oksida yang bersifat semikonduktor sehingga memungkinkan material ini



memiliki kestabilan termal serta konduktivitas listrik yang baik. ZnO merupakan salah satu jenis semikonduktor dengan tipe-n yang mana secara umum dilakukan *doping* dengan material dari golongan unsur seperti Al, In, dan Ga untuk memperbaiki sifat tertentu dari material ini. Aluminium dipilih menjadi *dopant* yang sesuai karena harganya yang murah serta keefektifan yang diberikan ketika dilakukan proses *doping* pada material ZnO (Shui A., et al., 2009). Berbagai metode sintesis untuk memperoleh material *Al-doped* ZnO telah banyak dilakukan. Pada penelitian yang dilakukan Tsubota, et al. (1997), sintesis material seng oksida dengan *doping* aluminium dari alumina dilakukan dengan metode *solid state*. Diketahui bahwa nilai konduktivitas listrik dari seng oksida menjadi meningkat dan konduktivitas termal dari material ini menurun. Kemudian, penelitian yang dilakukan oleh Cai, et al. (2003), menunjukkan bahwa terdapat fasa impuritas yang menurunkan konduktivitas listrik dari material yang dihasilkan ketika dilakukan penambahan Al_2O_3 menggunakan metode *sol-gel* pada komposisi tertentu. Selain dua metode tersebut, terdapat banyak metode lain seperti *hydrothermal*, *plasma pyrolysis*, *CVD*, dan kopresipitasi.

Metode kopresipitasi adalah metode dengan teknik yang sederhana dan berpotensi untuk menghasilkan ZnO dengan *doping* Al yang homogen. Shui, et al. (2009), melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi komposisi *doping* aluminium terhadap resistivitas material seng oksida dengan metode kopresipitasi. Dari penelitian yang dilakukan diketahui bahwa resistivitas dari *Al-doped* seng oksida semakin menurun dengan naiknya penambahan aluminium. Kemudian, Zhang et al. (2014), melakukan penelitian dengan variasi komposisi dengan bahan *prekursor* berupa hidrat menggunakan metode kopresipitasi yang dimodifikasi pada beberapa perlakuan. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa resistivitas dari serbuk *Al-doped* seng oksida (AZO) juga mengalami penurunan.

Dari berbagai penelitian yang dilakukan, variasi komposisi dari penambahan aluminium berpengaruh terhadap

BAB I PENDAHULUAN



sifat listrik dan termal dari material ZnO. Penelitian ini dilakukan untuk menyempurnakan penelitian yang ada sebelumnya dengan melakukan sintesis material *Al-doped* ZnO dari material ZnO dan Al_2O_3 menggunakan metode kopresipitasi dengan variasi pada komposisi penambahan serbuk Al_2O_3 .

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap sifat listrik material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap sifat termal material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi?

1.3. Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil akhir dari penelitian dengan tingkat keakuratan yang baik dan sesuai dengan apa yang diinginkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengotor pada serbuk ZnO dan Al_2O_3 dianggap tidak ada.
2. Kecepatan *stirring* pada *hot plate magnetic stirrer* dianggap konstan.
3. Temperatur *holding* pada proses *sintering* dianggap konstan.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap sifat listrik material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi.



2. Menganalisis pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap sifat termal material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi.

1.5. Manfaat Penelitian

Untuk penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan material semikonduktor seng oksida dengan *doping* aluminium dari alumina yang dapat digunakan dalam aplikasi material *thermoelectric*. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya agar penelitian mengenai material *thermoelectric* dapat terus berkembang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Termoelektrik

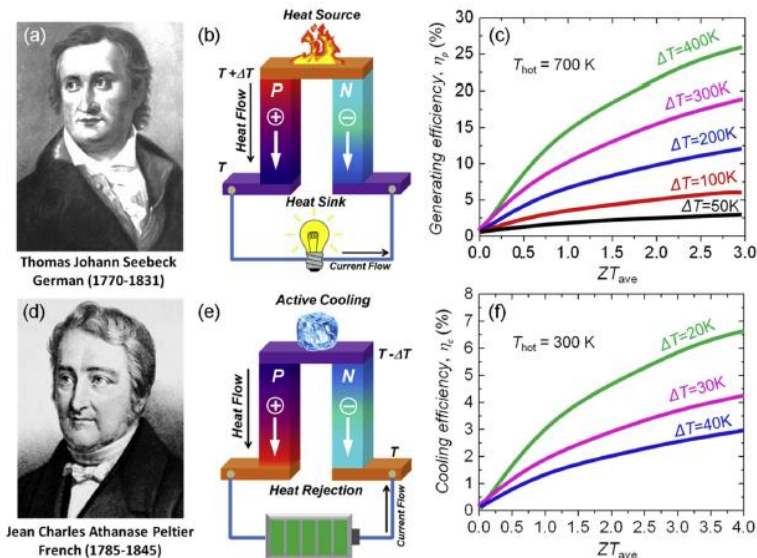
2.1.1. Efek Seebeck, Peltier, dan Thomson

Mekanisme kerja dari teknologi termoelektrik adalah dengan mengonversi energi panas akibat dari perbedaan temperatur menjadi listrik secara langsung atau mekanisme sebaliknya, yaitu dari listrik menjadi energi panas atau dingin. Teknologi ini memanfaatkan efek termoelektrik yang mana telah ditemukan sejak abad ke-19. Thomas Johann Seebeck memperlihatkan sebuah hasil eksperimen yang menarik bahwa sebuah jarum kompas dapat bergerak oleh sebuah sambungan atau rangkaian sirkuit tertutup dari dua buah logam yang berbeda. Jarum bergerak ketika pada sirkuit diberikan suatu gradien temperatur yang kemudian sirkuit ini didekatkan pada jarum. Fenomena ini disebut dengan efek Seebeck, yang digambarkan secara sederhana pada **Gambar 2.1 (b)**, dimana suatu perbedaan temperatur dapat menggerakkan pembawa muatan pada material (berupa elektron atau *hole*) untuk berdifusi dari bagian yang panas menuju bagian yang dingin, kemudian akibat dari hal tersebut menghasilkan sebuah arus listrik yang melewati sebuah sirkuit (Li, et al., 2010). Efek Seebeck merupakan model dari generator *thermoelectric*.

Untuk beberapa situasi yang ekstrim atau keadaan tertentu, teknologi *thermoelectric* dapat bersifat sebaliknya. Berlawanan dengan efek Seebeck, efek Peltier merupakan sebuah efek dimana kemunculan dari panas atau dingin dihasilkan dari energi listrik dari dua buah jenis konduktor yang berbeda. Seperti yang terlihat pada **Gambar 2.1(e)**, ketika sebuah arus dibuat mengalir di sepanjang sirkuit maka pada sambungan bagian atas akan mengembangkan panas yang kemudian diserap dan ditolak oleh sambungan bagian bawah. Sehingga pada akhirnya terbentuk pendingin aktif pada bagian ujung atas. W. Thomson (kemudian dikenal sebagai Lord Kelvin) menemukan sebuah hubungan



antara efek Seebeck dan Peltier dengan menerapkan teori termodinamika pada eksperimennya. Ia melakukan eksperimen dengan menggunakan konduktor yang homogen. Efek Seebeck dan Peltier ternyata juga ditemukan pada konduktor yang sejenis (homogen). Sehingga, fenomena ini kemudian dikenal sebagai efek Thomson (Goldsmid, 2010).



Gambar 2.1. Skema Ilustrasi dari Pembangkit Tenaga Termoelektrik (Zhang & Zhao, 2015).

Sistem *thermoelectric* merupakan sebuah teknologi konversi energi yang ramah lingkungan dengan beberapa keuntungan seperti ukuran atau dimensi yang kecil, realibilitas yang tinggi, tanpa polutan, dan kelayakannya yang mana dapat bertahan dalam rentang temperatur yang lebar. Menurut Gayner & Kar (2016), beberapa hal yang terkait dengan sifat *thermoelectric* adalah sebagai berikut.



a) *Figure of Merit (ZT)*

Suatu simbol atau lambang untuk menyatakan performa dari *thermoelectric*. Untuk material *thermoelectric* yang ideal, nilai dari ZT seharusnya bernilai ≥ 1 untuk menjaga efisiensi menjadi $>10\%$. Nilai ZT suatu material dapat diperoleh melalui **Persamaan 2.1**.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} \quad (2.1)$$

dimana:

- α = koefisien Seebeck;
- σ = konduktivitas listrik material;
- κ = konduktivitas panas material;
- T = temperatur

b) *Koefisien Seebeck*

Kriteria untuk pengukuran koefisien Seebeck dari material *thermoelectric* adalah sebagai berikut: (i) baik temperatur maupun voltase harus diukur secara serentak ketika sistem dalam keadaan *steady state*, (ii) respon dari voltase serta perbedaan temperatur harus linear, dan (iii) temperatur dan voltase harus diukur pada titik yang sama.

Hubungan Mott untuk koefisien Seebeck ditunjukkan dalam **Persamaan 2.2**.

$$\alpha = \frac{\pi^2 \kappa_B}{3 q} \kappa_B T \left(\frac{1}{n} \frac{dn(E)}{dE} + \frac{1}{\mu} \frac{d\mu(E)}{dE} \right) \quad (2.2)$$

dimana:

- E = E_F (energi Fermi)
- T = temperatur,
- n(E) = densitas dari pembawa muatan pada suatu energi (E),
- $\mu(E)$ = mobilitas pada energi (E),
- q = muatan elektronik

c) *Konduktivitas Listrik*

Merupakan konstanta proporsionalitas dari densitas arus dengan medan listrik yang diberikan; atau diartikan juga sebagai



sebuah ukuran dimana suatu material dapat menghantarkan arus listrik (Callister & Rethwisch, 2009).

Konduktivitas listrik suatu material dinyatakan pada **Persamaan 2.3**.

$$\sigma = e (\mu \cdot n + \mu \cdot p) \quad (2.3)$$

yang mana:

- μ_e = mobilitas elektron,
- μ_h = mobilitas dari *hole*,
- n = nilai densitas dari elektron,
- p = nilai densitas dari *hole*.

d) Konduktivitas Termal

Konduksi termal adalah fenomena yang mana panas ditransfer dari daerah senyawa yang memiliki temperatur tinggi menuju ke daerah yang temperaturnya lebih rendah. Sifat yang menggambarkan kemampuan dari suatu material untuk mentransfer panas disebut dengan konduktivitas termal. Ketika sebuah jenis tunggal dari pembawa muatan menjadi yang dominan dalam sebuah material, jumlah dari konduktivitas panas (κ) adalah jumlah dari konduktivitas panas dari kisi ($\kappa_{lattice}$) dan konduktivitas panas dari pembawa muatan (κ_C), sehingga, $\kappa = \kappa_C + \kappa_{lattice}$. Konduktivitas panas yang lebih rendah dapat diperoleh dengan memaksimalkan rasio $\kappa_C/\kappa_{lattice}$. Nilai konduktivitas termal suatu kisi pada material dinyatakan pada **Persamaan 2.4**.

$$\kappa_{lattice} = D \cdot C_p \cdot \rho \quad (2.4)$$

yang mana:

- D = difusivitas termal,
- C_p = panas spesifik,
- ρ = densitas dari bahan.

Heat flux pada proses konduksi termal dapat dinyatakan pada **Persamaan 2.5**.

$$q = -k (dT/dx) \quad (2.5)$$

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



yang mana:

q = *heat flux* atau aliran panas, per satuan waktu per satuan luas (luas yang digunakan adalah yang tegak lurus dengan arah aliran),

k = konduktivitas termal,

dT/dx = *temperature gradient* pada media konduksi.

2.1.2. Aplikasi Material Termoelektrik

Radioisotope Thermoelectric Generators (RTG) telah lama digunakan sebagai pembangkit tenaga untuk satelit dan roket riset luar angkasa, seperti Apollo 12, Voyager 1, dan Voyager 2. Saat ini, pembangkit daya dengan menggunakan *thermoelectric* mengalami peningkatan aplikasi dari berbagai macam bidang dan sumber energinya dapat berasal dari *fuel*, *waste-heat*, energi geotermal, energi matahari, dan radioisotop. Dalam skala aplikasi yang lebih besar, material *thermoelectric* ini diharapkan dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk menggantikan energi dari bahan bakar fosil, sejajar dengan sumber-sumber energi alternatif yang lain seperti tenaga air, geotermal, energi surya, energi angin, energi berbahan bakar biogas, dan energi nuklir (Sutjahja, 2011).

2.2. Material Termoelektrik

Material *thermoelectric* yang ideal seharusnya menunjukkan konduktivitas listrik yang tinggi dan konduktivitas termal yang rendah. Konduktivitas elektrik yang tinggi dibutuhkan untuk meminimalisir efek pemanasan Joule dan konduktivitas panas yang rendah dibutuhkan untuk menghasilkan perbedaan temperatur yang besar. Parameter-parameter seperti konduktivitas listrik dan konduktivitas panas dalam sebuah material tunggal dapat dikontrol dengan berbagai macam strategi seperti *doping* (Pei, et al., 2012), *nanstructuring*, dan *nanocomposites* (Liu & Qin, 2012).



2.2.1. Material Semikonduktor Seng Oksida (ZnO)

Dalam aplikasi pembangkit listrik dengan menggunakan teknologi termoelektrik, secara umum bahan yang digunakan adalah semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor merupakan bahan yang mampu menghantarkan arus listrik namun tidak sempurna.

Secara fisik, ZnO berbentuk serbuk berwarna putih dan secara umum disebut sebagai *zinc white/zincite*. ZnO hampir tidak larut di dalam air dan alkohol, namun dapat larut dalam asam seperti asam klorida. Bentuk kristalin dari ZnO secara alami bersifat termokromik dan karena hal tersebut, warnanya dapat berubah dari putih hingga jingga akibat adanya pemanasan. ZnO memiliki sifat termal yang baik seperti titik didih yang tinggi, kapasitas termal yang tinggi, dan koefisien ekspansi termal yang rendah (Kumar & Sahu, 2010).

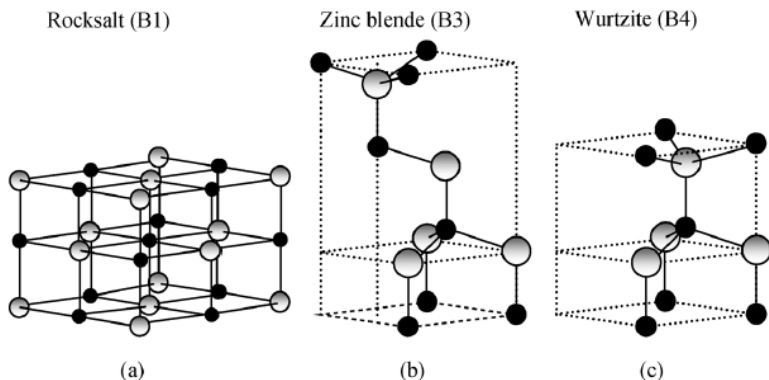
Berikut adalah **Tabel 2.2** yang menjelaskan mengenai beberapa sifat fisik dari material ZnO.



Tabel 2.1. Sifat Fisik dari ZnO (Fan & Lu, 2005).

| Sifat | Nilai |
|--------------------------------------|---|
| Rumus Molekul | ZnO |
| Massa Molar | 81.4084 g/mol |
| Densitas | 5.606 g/cm ³ |
| Titik <i>Melting</i> (Tm) | 1975° C |
| Titik Didih (Tb) | 2360° C |
| Konstanta Kisi | $a_o = 0.32469 \text{ \AA}$ $c_o = 0.52069 \text{ \AA}$ |
| Energi <i>gap</i> | 3,4 eV <i>direct</i> |
| Konsentrasi Pembawa Muatan Intrinsik | $< 10^6/\text{cc}$ |
| Mobilitas elektron (pada 300 K) | 200 cm ² /V.detik. |
| Mobilitas <i>hole</i> (pada 300 K) | 5-50 cm ² /V.detik |

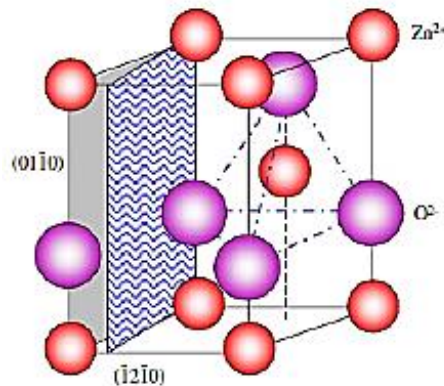
Seng oksida memiliki tiga jenis bentuk kristal yaitu *wurtzite* heksagonal, *zincblende* kubik, dan yang jarang teramati adalah bentuk kubik *rocksalt* seperti pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. Penggambaran *Stick-and-Ball* dari Struktur Kristal Seng Oksida (Morkoç & Özgür, 2009).



Struktur *wurtzite* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3** merupakan struktur yang paling stabil dan dengan demikian merupakan struktur yang paling umum ditemukan. ZnO memiliki struktur *wurtzite* yang stabil dengan nilai kisi secara teori yaitu $a = b = 0.325$ nm dan $c = 0.521$ nm, sehingga struktur ini memiliki konstanta kisi a dan c yang mana memiliki hubungan $c/a = 1.633$ Å. Struktur *wurtzite* ini memiliki susunan *hexagonal close packing (HCP)*.



Gambar 2.3. Struktur *Wurtzite* dari ZnO.

Seng oksida diklasifikasikan ke dalam semikonduktor dari grup II-VI yang mana kovalennya berada pada batas antara semikonduktor ionik dan kovalen. Material ini memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik. Beberapa sifat dari seng oksida yang berbeda dari material semikonduktor atau oksida lainnya serta membuatnya memiliki banyak manfaat adalah sebagai berikut:

- *Band gap* yang lebar. Seng oksida memiliki nilai *band gap* sebesar 3,44 eV pada temperatur rendah dan 3,37 eV pada temperatur kamar (Mang, et al., 1995).
- Energi ikat *exciton* yang lebar. Energi ikat *free-exciton* dalam seng oksida adalah 60 meV. Energi ikat *exciton* yang besar ini menunjukkan emisi *excitonic* yang efisien dalam material seng

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



oksida sehingga dapat bertahan pada temperatur kamar dan temperatur yang lebih tinggi (Bagnall, et al., 1997).

Karena sifat yang unik tersebut yang mana memiliki *band gap* yang lebar dan energi ikat eksitasi yang besar, ZnO memiliki potensi untuk diaplikasikan di berbagai aplikasi elektronik seperti sensor kimiawi, *solar cells*, *luminescence devices*, termoelektrik, dan sebagainya. Berbagai penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa ZnO cenderung memiliki sifat sebagai semikonduktor tipe-n karena adanya *defect* interstisi dan *vacancies* (Fan & Lu, 2005).

2.2.2. Material Al_2O_3 sebagai Sumber *Dopant*

Aluminium oksida (alumina; Al_2O_3) memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan material keramik lainnya dalam sifat termal, kimia, dan fisik, dan banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti batu tahan api serta perlengkapan *integrated circuit* (IC). $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ merupakan bentuk yang paling stabil dari senyawa yang terbentuk antara aluminium dan oksigen, dan merupakan produk akhir dari perlakuan panas atau *dehydroxylation* untuk semua *hydroxides* (Shirai, et al., 2009). Sifat fisik dari material Al_2O_3 ditunjukkan **Tabel 2.2** berikut.

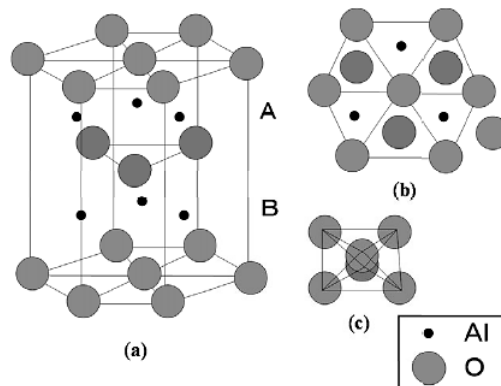


Tabel 2.2. Sifat Fisik Al_2O_3 (Aluminum Oxide Ceramics & Properties-Marketech International Inc.).

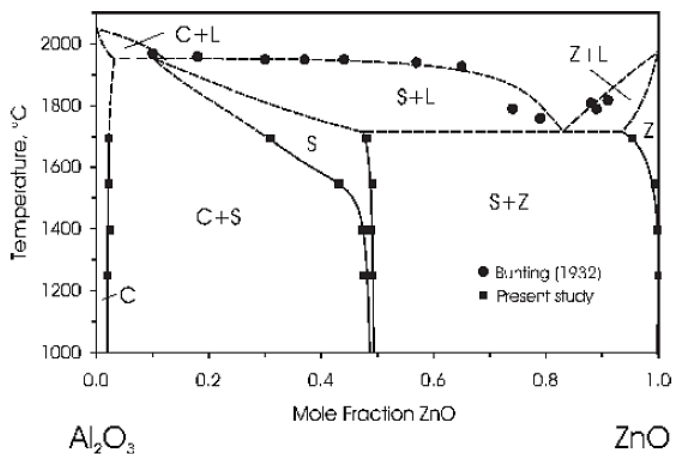
| Sifat Mekanik | | | |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|
| Sifat | Kondisi (Celcius) | Satuan | Nilai |
| <i>Bulk density</i> | 20 derajat | g/cm^3 | 3.96 |
| <i>Tensile Strength</i> | 20 derajat | MPa | 220 |
| <i>Flexural Strength</i> | 20 derajat | >MPa | 410 |
| <i>Elastic Modulus</i> | 20 derajat | Gpa | 375 |
| <i>Hardness</i> | 20 derajat | kg/mm^2 | 14 |
| <i>Fracture Toughness</i> | 20 derajat | $\text{MPa.m}^{1/2}$ | 4-5 |
| <i>Porosity</i> | 20 derajat | % | 0 |
| Sifat Termal | | | |
| Temperatur kerja maksimum | - | $^{\circ}\text{C}$ | 1700 |
| Koefisien Ekspansi Termal | 25-1000 | $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 8.1 |
| Konduktivitas Termal | 20 | $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ | 28 |
| Sifat Listrik | | | |
| <i>Dielectric Constant</i> | 1 MHz | - | 9.7 |
| <i>Volume Resistivity</i> | 1000 | Ohm-cm | 10^6 |



Struktur kristal dari material *corundum* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4. (a) Struktur *Corundum* pada $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, (b) Sisi Atas dari Struktur *Corundum*, dan (c) Struktur *Octahedral* dari $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.



Gambar 2.5. Sistem *Binary* dari Al_2O_3 - ZnO . Liquid (L), Fasa Primer yaitu *Corundum* (C), *Spinel* (S), and *Zincite* (Z) Tertuang pada Diagram (Hansson, et al., 2005).



Berdasarkan diagram fasa dari sistem $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ pada **Gambar 2.5**, ditunjukkan bahwa reaksi yang terjadi akan berbeda dan dipengaruhi oleh temperatur, sehingga merubah fungsi dari aluminium di dalam matriks ZnO.

Proses *doping* seng oksida untuk konduktivitas tipe-n dapat dicapai dengan mengganti atom Zn dengan atom unsur yang memiliki valensi lebih tinggi seperti Aluminium (Al), Indium (In), dan Gallium (Ga). Dari hampir semua *dopant* yang pernah diteliti, *Al-doped ZnO* menarik banyak perhatian karena kemampuan aplikasinya sebagai oksida konduktif yang murah, sangat melimpah, dan sangat stabil. Pendopingan dengan aluminium lebih disarankan karena kemampuan material ini untuk bergabung dengan mudah di dalam struktur seng oksida dan menurunkan resistivitas listrik dari material tanpa terjadi *impairing*. *Al-doped ZnO* dalam bentuk nanovoids (*nanosized closed pores*) telah dikonfirmasi efektif untuk meningkatkan performa termoelektrik dengan menurunkan nilai konduktivitas termal akibat mekanisme *phonon scattering* (Ohtaki & Araki, 2011).

2.3. Defect pada Material Keramik

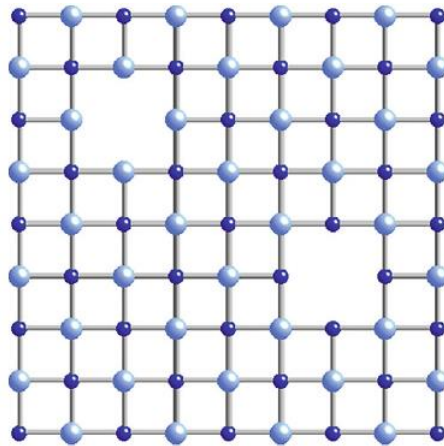
Ada berbagai macam sifat fisis yang dipengaruhi oleh cacat kristal pada material keramik seperti konduktivitas listrik dan sifat mekanik. *Point defects* merupakan hal yang penting dalam dunia keramik karena perannya yang dapat menentukan sifat dari material. Berbeda dengan logam murni dan kristal unsur, *point defects* lebih sulit untuk dijelaskan secara langsung karena keadaan dalam material keramik lebih kompleks. Sehingga, jenis *defects* yang muncul dalam keadaan “gabungan” netral dan jatuh menjadi satu kesatuan, dibagi menjadi tiga kategori:

a. *Stoichiometric defects*

Defect jenis ini didefinisikan sebagai salah satu jenis *defect* yang mana susunan kimia dari kristal, seperti rasio dari kation terhadap anionnya, tidak mengalami perubahan dan

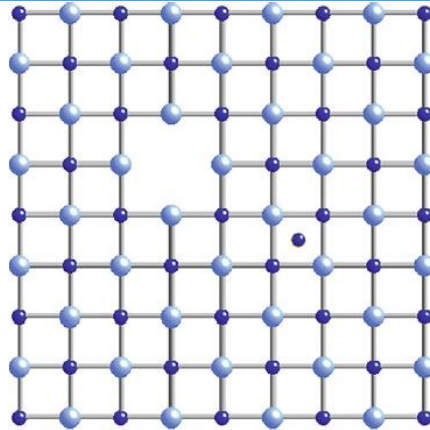


contohnya adalah *defect* Schottky dan Frenkel. *Schottky defect* adalah sekumpulan kekosongan yang dibuat dari penghilangan satu atom untuk setiap atom di dalam rumus kimia. Seperti yang terdapat dalam kristal stoikiometri dari MgO , yang mana diperoleh satu pasang kekosongan, satu dari sub kisi Mg dan satu dari sub kisi O yang terdapat pada **Gambar 2.6** berikut (Carter & Norton, 2013).



Gambar 2.6. *Schottky Defect.*

Jika sebuah atom berada pada sisi manapun yang mana tidak tergabung menjadi kristal sempurna, maka hal ini disebut interstisi. *Frenkel defect* merupakan sebuah pasangan dari kekosongan dan interstisi yang terbentuk dari hilangnya atom dari suatu sisi dalam struktur kristal dan membuat atom tersebut interstisi seperti yang terlihat pada **Gambar 2.7** (Carter & Norton, 2013).



Gambar 2.7. *Frenkel Defect.*

b. *Nonstoichiometric defects*

Cacat atau *defect* secara nonstoikiometri merupakan cacat yang terjadi karena adanya penambahan ataupun pengurangan (dengan kata lain terjadi perubahan) pada komposisi kristal. Cacat semacam ini disebabkan karena keadaan tertentu seperti terjadinya perubahan termodinamika sistem yang mengakibatkan perubahan struktur kristal.

c. Cacat ekstrinsik

Cacat jenis ini merupakan cacat kristal yang terjadi karena kehadiran impuritas (pengotor) dalam kristal induk.

Dalam paduan biner yang murni, cacat kristal dapat berupa:

1. Kekosonga (*vacancy*), keadaan dimana atom menghilang (meninggalkan keadaan semula).
2. Atom interstisi, yang mana atom berada dalam suatu lokasi kristal yang tidak semestinya.
3. Atom salah lokasi, atom ditemukan berada pada tempat yang mestinya ditempati oleh atom lain. Cacat ini secara umum ditemukan pada keramik kovalen, dimana atom-atomnya tidak bermuatan (bukan ion).



4. Elektron bebas, terdapat elektron-elektron yang berada pada pita konduksi.
5. *Hole*, pembawa muatan yang ada pada pita valensi.
6. Impuritas interstisi dan substitusi. (Barsoum, 2003)

Doping merupakan proses *alloying* dengan intensitas tertentu untuk material semikonduktor dengan konsentrasi impuritas donor atau akseptor yang dikontrol. Semikonduktor ekstrinsik (baik tipe-n dan -p) terbuat dari material yang memiliki kemurnian cukup tinggi. Konsentrasi dari donor atau akseptor spesifik yang terkontrol kemudian ditambahkan dengan berbagai teknik. Seperti proses *alloying*, dalam material semikonduktor proses ini disebut dengan *doping* (Callister & Rethwisch, 2009).

2.4. Kopresipitasi

Berdasarkan nomenklatur dari *IUPAC*, kopresipitasi adalah pengendapan serentak atau bersama-sama dari suatu komponen yang terlarut secara normal oleh makrokomponen dari larutan yang sama dengan bentuk kristal yang tercampur, adsorpsi, oklusi, atau jebakan mekanik. Kopresipitasi sangat cocok untuk memunculkan komponen katalis dengan distribusi yang homogen, atau untuk pembuatan prekursor dengan stoikiometri yang jelas dan pasti. Apabila prekursor untuk produk akhir merupakan senyawa yang didefinisikan secara stoikiometri adalah penyusun produk akhir, proses kalsinasi dan/atau reduksi untuk menghasilkan hasil akhir biasanya dapat menjadikan komponen sangat kecil dengan kristalit yang tercampur (McNaught & Wilkinson, 1997).

Metode ini banyak digunakan dalam dunia industri dan penelitian untuk membentuk oksida yang kompleks. Hal utama yang menjadikan keuntungan dari metode kopresipitasi adalah kesederhanaan dari proses ini. Pencampuran atomik dari konstituen dengan metode kopresipitasi kimia menghasilkan produk akhir yang mendekati stoikiometri yang sempurna tanpa perlakuan pada temperatur yang tinggi. Metode kopresipitasi kimia dimulai dengan melarutkan bahan oksida dengan



menggunakan asam atau garam dalam media *aqueous*. Larutan ini kemudian dicampur dengan larutan *dissolved precipitation agent* seperti *oxalic acid*, *ammonium oxalic*, atau *ammonium hydroxide*. Hasil akhir dari oksida kristalin diperoleh dari pemanasan *precipitate* pada temperatur yang tinggi (Wang, et al., 2003).

Metode kopresipitasi merupakan salah satu metode sintesis untuk membentuk suatu senyawa anorganik yang didasarkan pada pengendapan lebih dari substansi secara bersama-sama melewati titik jenuh. Kopresipitasi menjadi metode yang menjanjikan karena proses kopresipitasi menggunakan temperatur yang rendah dan lebih mudah untuk mengontrol ukuran partikel sehingga waktu yang diperlukan relatif lebih singkat. Produk dari metode ini diharapkan memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dan homogen dibandingkan dengan metode *solid state* (Rosyidah, et al., 2012)

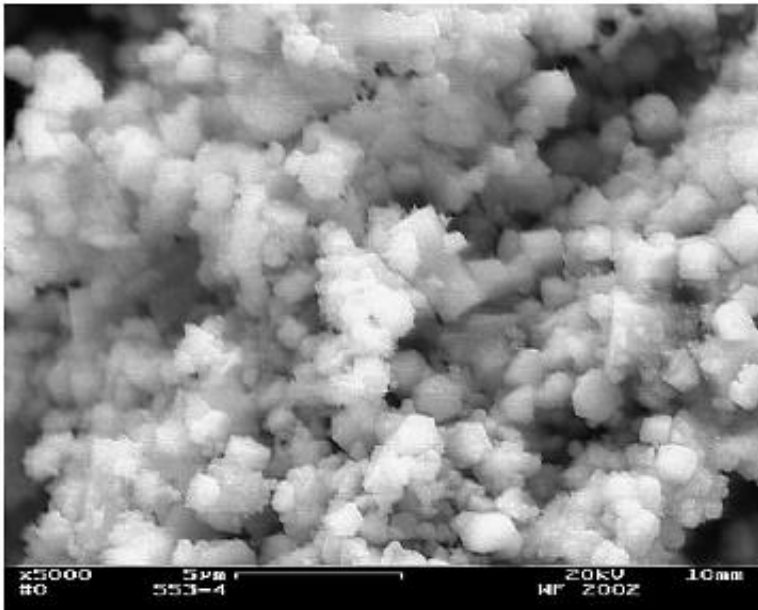
2.5. Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian mengenai material seng oksida dengan doping aluminium telah banyak dilakukan dan berbagai hasil penelitian telah dibahas.

Penelitian mengenai material $(\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x)\text{O}$ berawal dari penelitian yang dilakukan Tsubota, et al. (1997). Serbuk ZnO dan Al_2O_3 dicampur dalam suatu ball mill selama 24 jam kemudian dipress hingga menjadi *pellet* dan dilakukan proses *sintering* pada temperatur 1400°C selama 10 jam dengan atmosfer udara. Laju pemanasan dan pendinginan adalah sebesar 200°C h^{-1} . Campuran oksida $(\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x)\text{O}$ pada penelitian ini menggunakan variasi $x = 0 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,02 ; 0,05$. Penelitian yang dilakukan menghasilkan material yang berpotensi untuk aplikasi *thermoelectric* pada temperatur tinggi. Nilai σ menjadi tiga orde lebih tinggi jika dibandingkan dengan *undoped ZnO*. Batas kelarutan Al dalam ZnO adalah kurang dari $x = 0,05$ dari hasil pengukuran. Konduktivitas termal dari material ini menurun dengan meningkatnya jumlah penambahan Al_2O_3 .



Kemudian pada tahun 2003, Cai, K. bersama peneliti lainnya melakukan penelitian dengan melakukan metode sol-gel menggunakan material awal $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ dan Al_2O_3 serbuk. Setelah Al_2O_3 dicampurkan dengan $\text{Zn}(\text{Ac})_2$ melalui metode sol-gel, material hasil pencampuran diberi perlakuan *hot-pressed* yang kemudian dilakukan pengujian menggunakan beberapa peralatan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan terbentuknya fasa impuritas berupa ZnAl_2O_4 . Pada temperatur kamar diperoleh nilai konduktivitas listrik yang meningkat dengan penambahan Al_2O_3 sebesar 1 hingga 5 mol%. **Gambar 2.8** menunjukkan morfologi partikel dari material yang terbentuk.

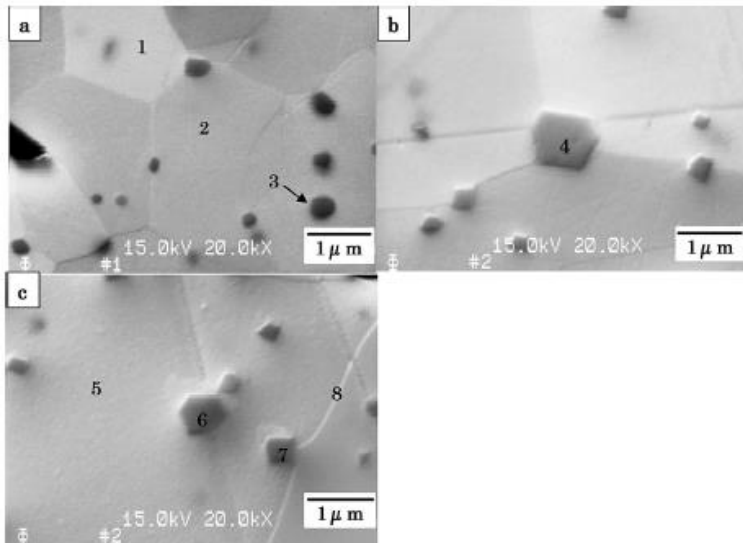


Gambar 2.8. Hasil SEM dari Material Al_2O_3 yang Ditambahkan pada ZnO (Cai, et al., 2003).

Pada tahun 2007, Shirouzu et al., melakukan penelitian mengenai distribusi dan batas kelarutan Al di dalam Al_2O_3 -doped



ZnO sintered body. Pada penelitian yang dilakukan Shirouzu, material yang digunakan berupa serbuk ZnO , Al_2O_3 , dan $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ dimana dilakukan dengan metode *powder mixing* dan *colloidal*. Dari percobaan yang telah dilakukan diperoleh konsentrasi dari Al yang terlarut ke dalam ZnO adalah sekitar 0,3 at.%. **Gambar 2.9** menunjukkan struktur mikro dari material hasil sintesis untuk metode *powder mixing* dan *colloidal*.



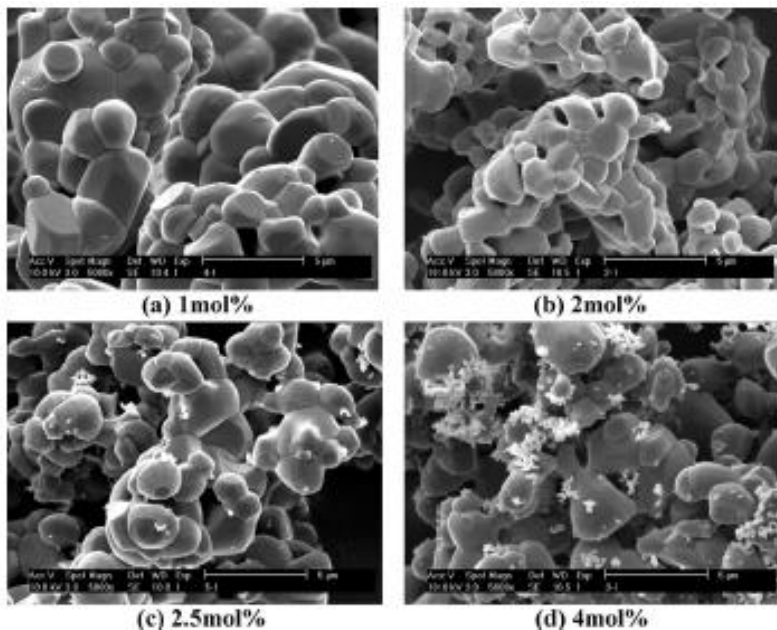
Gambar 2.9. Gambar SEM dari *ZnO Sintered Body* (Shirouzu, 2007).

Dalam penelitian Anze Shui, et al., (2009), serbuk *Al-doped ZnO* (AZO) dipersiapkan dari larutan *zinc nitrate* dan *aluminium nitrate* dengan metode kopresipitasi. *Stirring* dilakukan pada temperatur 70°C selama 40 menit serta *drying* pada 100°C selama 24 jam di dalam oven elektrik. Konsentrasi aluminium yang diamati pada penelitian ini adalah 0,5 - 8 mol% dan temperatur kalsinasi yang diterapkan adalah $900\text{-}1400^\circ\text{C}$

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



selama 1-3 jam. Hasil penelitian adalah serbuk AZO yang bersifat konduktif berhasil dipersiapkan. Resistivitas dari AZO mencapai nilai terendah pada *doping* 2 mol % yang mana dipersiapkan pada temperatur kalsinasi 1300° C selama 2 jam. Hasil mikrostruktur dari material yang terbentuk dapat diamati pada **Gambar 2.10**.



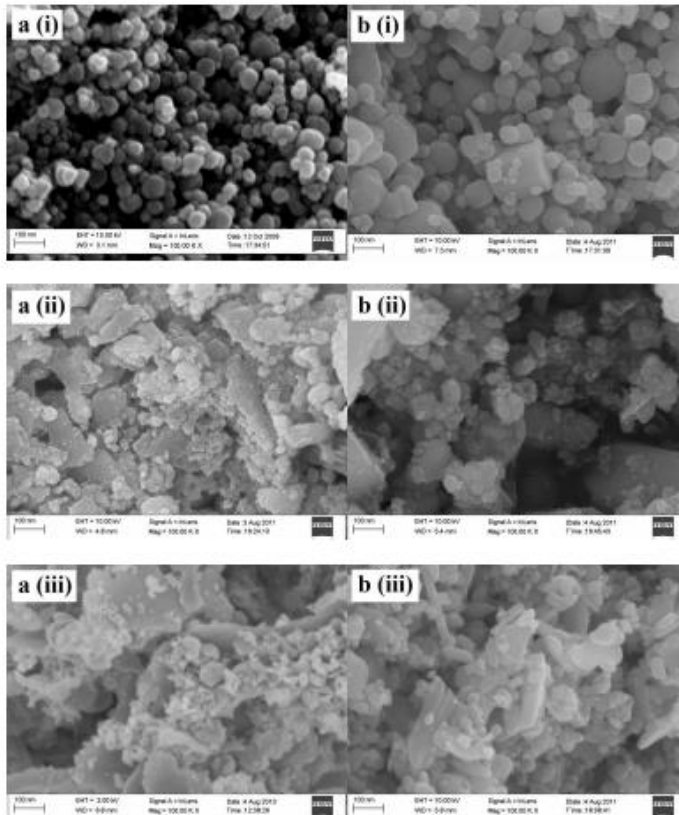
Gambar 2.10. Mikrografi SEM dari Serbuk AZO (Shui, 2009).

Wasi Khan, et al., (2013), melakukan penelitian dengan menggunakan *zinc acetate dehydrate* dan *aluminium nitrate nanohydrate* sebagai material dasar untuk membuat nanopartikel AZO. Tiga buah komposisi atomik untuk aluminium dipilih yaitu 0,5 at%, 1 at%, dan 2 at%. Material diaduk pada temperatur 80°



C hingga terbentuk *gel*. Kemudian ditambahkan asam sitrat hingga pH mencapai 1,5 dan setelah itu ditambahkan larutan NH_3 . Material diletakkan di dalam oven dan dikeringkan pada temperatur 100°C . Terakhir, material dioksidasi pada temperatur 600°C . Berdasarkan hasil penelitian, variasi konten aluminium tidak terlalu mempengaruhi struktur fasa dan kualitas kristalin. Namun, nilai maksimum dari *gap energy* sebesar 3,44 eV dapat dicapai pada komposisi 2 at%.

Sabril, et al., (2013) melakukan penelitian dengan material yang digunakan adalah ZnCl_2 , Na_2CO_3 , NaCl , dan AlCl_3 (A= “Al” dan “In”). Serbuk prekursor kemudian *dimilling* selama 5 jam pada 500 rpm dengan perlakuan panas yang berbeda (500°C dan 600°C) serta dilakukan *leaching*. Variasi x dari $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ adalah 0 ; 0,02 ; 0,04 ; 0,06 ; dan 0,08. Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan jika rata-rata ukuran kristalit menurun dengan penambahan aluminium maupun indium yang mana dapat dilihat pada **Gambar 2.11**.

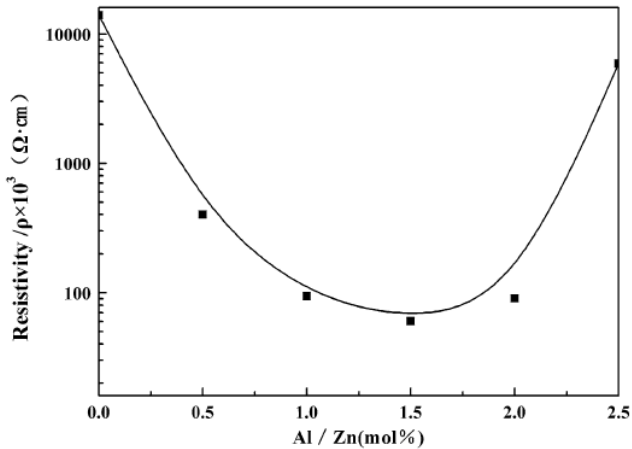


Gambar 2.11. Gambar FESEM dari ZnO (Sabri, 2013).

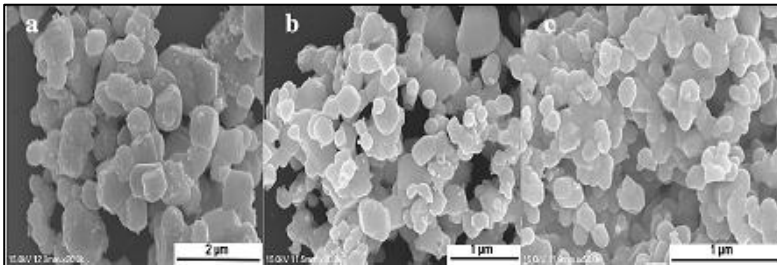
Selanjutnya, P. Zhang, et al., (2014), melakukan penelitian dengan membuat AZO menggunakan metode kopresipitasi kimia dengan material utamanya $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Rasio molar yang digunakan yaitu $n(\text{Al})/n(\text{Zn}) = 1.5$ at.%. Nilai x dari *Al-doped ZnO* serbuk yang konduktif memiliki variasi sebesar [$x = n(\text{Al})/n(\text{Zn}) = 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5,$ and 3.0 at.%]. Hasil dari penelitian ini adalah resistivitas dari serbuk AZO mencapai nilai minimum pada konsentrasi 1,5 at% dengan temperatur *post-calcination* 900°C dan waktu



holding 2 jam. Hasil penelitian ini terdapat pada **Gambar 2.12** dan **2.13**.



Gambar 2.12. Nilai Resistivitas Serbuk $x\text{Al-doped}$ (Zhang, et al., 2014).



Gambar 2.13. Morfologi dari Al-doped ZnO .

Dari berbagai penelitian tersebut diketahui bahwa beberapa sifat termoelektrik dari material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$, sangat dipengaruhi oleh jumlah atau komposisi *doping* dari aluminium. Selain itu, diketahui juga apabila sintesis material ini dapat dilakukan dengan berbagai metode, salah satunya dengan metode kopresipitasi dengan kelebihan yang dimiliki dari metode ini.



Oleh karena itu, pada penelitian ini akan disintesis $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ dengan metode kopresipitasi dengan dilakukan variasi penambahan Al_2O_3 yang diharapkan dapat diperoleh material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ sebagai kandidat material termoelektrik.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

A. Seng Oksida (ZnO)

Bahan *zinc oxide* yang digunakan pada penelitian ini adalah ZnO dalam bentuk serbuk berwarna putih. **Gambar 3.1** menunjukkan ZnO yang digunakan dalam penelitian ini. Secara umum, karakteristik dari serbuk ZnO ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1** berikut.

Tabel 3.1. Karakteristik Umum Serbuk ZnO

| Karakteristik | Nilai |
|------------------|--------------|
| Rumus Molekul | ZnO |
| Massa Molar (Mr) | 81, 37 g/mol |
| Assay | $\geq 99\%$ |
| Merk Dagang | Merck |



Gambar 3.1. Seng Oksida (ZnO)



B. Aluminium oksida (Al_2O_3)

Bahan *aluminium oxide* yang digunakan pada penelitian ini adalah *aluminium oxide* jenis *corundum* berbentuk serbuk berwarna putih. **Gambar 3.2** menunjukkan material yang digunakan. Secara umum, karakteristik dari serbuk ini terdapat pada **Tabel 3.2** berikut ini.

Tabel 3.2. Karakteristik Serbuk *Aluminium Oxide* (Al_2O_3)

| Karakteristik | Nilai |
|------------------|----------------------------|
| Rumus Molekul | Al_2O_3 |
| Massa Molar (Mr) | 101,96 g/mol |
| Fasa | α (Corundum) |
| Assay | 99, 99% |
| Ukuran | 100 mesh |
| Merk Dagang | Sigma Aldrich [®] |



Gambar 3.2. Aluminium Oksida (Al_2O_3)

C. Larutan Asam Klorida (HCl)

Larutan asam klorida yang digunakan adalah asam klorida yang mana berupa larutan bening yang terlihat pada



Gambar 3.3. Karakteristik umum dari larutan ini dapat dilihat pada **Tabel 3.3** berikut.

Tabel 3.3. Karakteristik Larutan Asam Klorida (HCl).

| Karakteristik | Nilai |
|----------------------|----------------------|
| Rumus Molekul | HCl |
| Massa Molar (Mr) | 36.46 g/mol |
| Kemurnian | $\geq 37\%$ |
| Merk Dagang | <i>SAP Chemicals</i> |
| <i>Free Chlorine</i> | $<0.0005\%$ |
| Iron | $<0.0005\%$ |



Gambar 3.3. Larutan Asam Klorida (HCl)

D. Larutan amonium hidroksida (NH₄OH)

Larutan NH₄OH yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan NH₄OH dengan merk dagang *SAP Chemicals* (**Gambar 3.4.**). Larutan ini digunakan untuk membentuk *zinc hydroxide* dengan metode *co-precipitation*. Karakteristik umum dari larutan ini dapat dilihat pada **Tabel 3.4** berikut.



Tabel 3.4. Karakteristik Larutan Amonium Hidroksida (NH_4OH).

| Karakteristik | Nilai |
|------------------|------------------------|
| Rumus Molekul | NH_4OH |
| Massa Molar (Mr) | 17.03 g/mol |
| Kemurnian | 25% - 28% |
| Merk Dagang | <i>SAP Chemicals</i> |
| <i>Chloride</i> | <0.005% |
| Iron | <0.0005% |
| Copper | <0.0005% |



Gambar 3.4. Larutan Ammonium Hidroksida (NH_4OH)

E. Aquades

Aquades digunakan untuk melarutkan asam klorida dan amonium hidroksida hingga mencapai molaritas yang ditentukan. Selain itu, bahan ini juga digunakan untuk membersihkan endapan yang terbentuk dan peralatan yang digunakan. Aquades yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 3.5.**



Gambar 3.5. Aquades

3.2. Alat Penelitian

Beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

A. Neraca Digital

Neraca digital yang digunakan pada penelitian ini memiliki merk Mettler Toledo yang mana ditunjukkan oleh **Gambar 3.6**. Alat ini digunakan untuk mengukur massa dari material ZnO dan Al_2O_3 dengan akurat.



Gambar 3.6. Neraca Digital Merk Dagang *Mettler Toledo*.



Spesifikasi dari alat ini terdapat pada **Tabel 3.5** berikut.

Tabel 3.5. Spesifikasi Neraca Digital.

| Karakteristik | Nilai |
|------------------------------|-------------|
| Kapasitas Maksimum | 200 gram |
| Ketelitian Alat | 0,0001 gram |
| Berat Alat | 4,6 kg |
| Diameter <i>weighing pan</i> | 90 mm |

B. *Hot plate Magnetic Stirrer*

Magnetic stirrer yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada **Gambar 3.7**. Alat ini digunakan untuk mencampur material yang digunakan dalam penelitian agar menjadi homogen. *Magnetic stirrer* ini dilengkapi dengan *hotplate* dan pemanas sehingga dapat dilakukan proses pencampuran pada temperatur tinggi.



Gambar 3.7. *Magnetic Stirrer* dengan *Hot Plate*.

C. *Carbolite Tube Furnace*

Furnace yang digunakan dalam penelitian ini adalah untuk melakukan proses pengeringan bahan dan sintering bahan setelah dilakukan metode kopresipitasi sehingga terbentuk material serbuk yang diinginkan. *Furnace* ini merupakan *furnace* horizontal yang mana terdapat pada **Gambar 3.8**.



Gambar 3.8 *Carbolite Tube Furnace*

D. Mesin Uji *X-ray Diffractometer (XRD)*

Alat ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terbentuk pada material hasil sintesis.

E. Mesin Uji *Scanning Electron Microscopy (SEM-EDX)*

Alat ini digunakan untuk melakukan identifikasi morfologi material hasil sintesis, komposisi, serta persebaran unsur dalam material.

F. Alat Uji *Konduktivitas Listrik (LRC meter)*

Alat ini digunakan untuk mengetahui sifat listrik dari material hasil sintesis.

G. Mesin Uji *Differential Scanning Calorimetry-Thermogravimetric Analysis (DSC-TGA)*

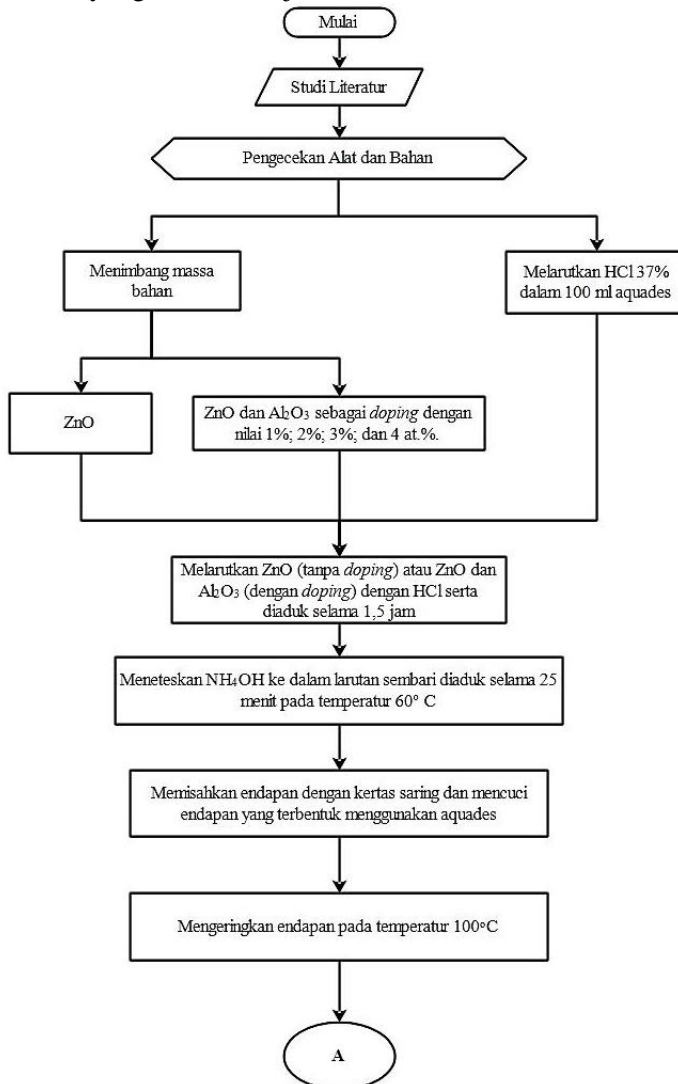
Alat ini digunakan untuk mengetahui sifat termal dari material hasil sintesis.

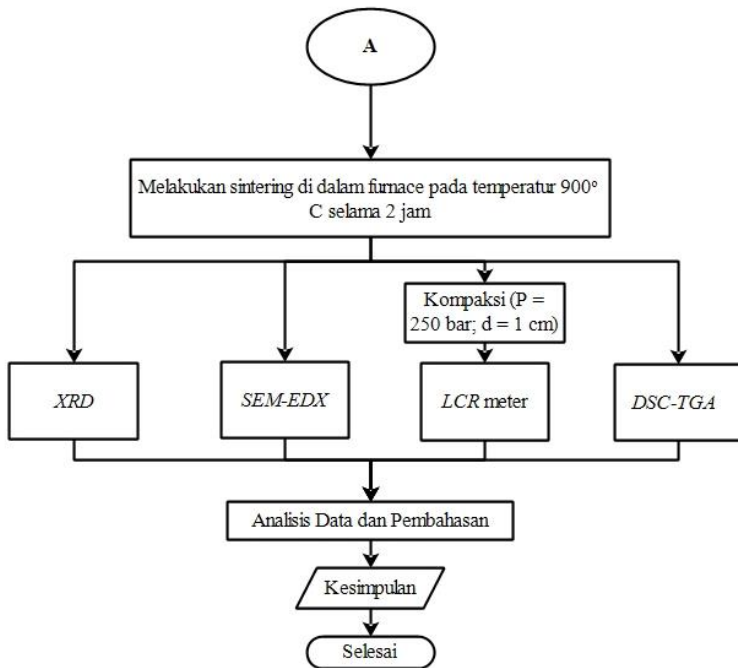
H. Peralatan lain seperti *crucible*, kertas lakmus, *aluminium foil*, tabung reaksi, gelas ukur, pipet tetes, spatula, kertas saring, dan corong kaca.



3.3. Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir dari penelitian yang dilakukan yang mana ditunjukkan **Gambar 3.9**.





Gambar 3.9. Diagram Alir Penelitian.



3.4. Rancangan Penelitian

Berdasarkan diagram alir pada **Gambar 3.9** di atas, penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi x dalam bentuk *at.%* (*atomic percent*) penambahan aluminium oksida, sehingga rancangan penelitian yang akan dilakukan adalah terdapat pada **Tabel 3.6** berikut.

Tabel 3.6. Perancangan Penelitian.

| Metode | Variasi x penambah an Al_2O_3 (<i>doping</i>) pada $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ | Hasil Pengujian | | | |
|---------------|---|-----------------|-------------|--------------------------|-------------|
| | | X R D | S E M | Konduktivitas Listrik | DSC- TGA |
| Kopresipitasi | 0 | v | v | v | v |
| | 0.01 | v | v | v | v |
| | 0.02 | v | v | v | v |
| | 0.03 | v | v | v | v |
| | 0.04 | v | v | v | v |

3.5. Tahapan Penelitian

Berikut adalah tahapan dari penelitian yang dilakukan agar hasil dari penelitian sesuai dengan harapan:

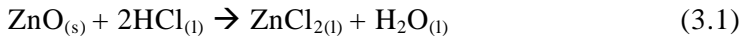
3.5.1. Preparasi

Persiapan yang dilakukan pada penelitian ini yang pertama adalah mempersiapkan bahan serta alat untuk sintesis. Seng oksida dan aluminium oksida ditimbang dengan menggunakan neraca digital dengan komposisi sesuai dengan perhitungan pada **Lampiran A**. Untuk penambahan aluminium oksida yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebesar 1, 2, 3, dan 4 *at.%*. Untuk larutan asam klorida dilakukan pengenceran dengan menggunakan aquades. Selain itu, larutan amonia hidroksida juga diencerkan. Setelah dilakukan pengenceran pada setiap larutan, material ZnO dan Al_2O_3 dilarutkan dengan HCl sehingga terbentuk larutan prekursor.

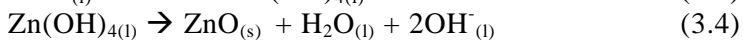
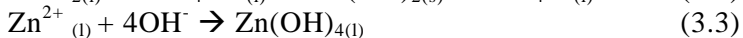


3.5.2. Sintesis Material ZnO tanpa *Doping*

Larutan prekursor yang terbentuk sesuai dengan **Persamaan 3.1** berikut ini.



Agar terbentuk larutan prekursor yang homogen, larutan ini diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada temperatur kamar selama 1,5 jam. Setelah 1,5 jam, larutan ini dipanaskan pada *hot plate magnetic stirrer* dengan tetep diaduk pada temperatur 60° C dan larutan NH₄OH diteteskan ke dalam larutan menggunakan pipet tetes hingga mencapai titik titrasi dan terbentuk endapan menurut **Persamaan 3.2** hingga **3.4** berikut.



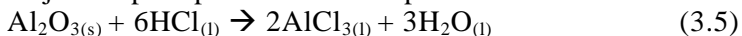
Larutan yang telah ditambahkan NH₄OH diaduk selama 25 menit pada temperatur 60° C.

Setelah itu, endapan dicuci dengan menggunakan aquades serta disaring menggunakan kertas saring. Langkah selanjutnya adalah mengeringkan endapan pada temperatur 100° C untuk menghilangkan air. Kemudian, serbuk dimasukkan ke dalam *crucible* dan disintering pada temperatur 900° C selama 2 jam di dalam *furnace*.

3.5.3. Sintesis Material Zn_(1-x)Al_xO

Untuk metode yang dilakukan pada sintesis material dengan *doping* sama dengan metode untuk pembuatan ZnO tanpa *doping*. Untuk pembuatan larutan prekursor dari material ZnO berdasar pada persamaan yang sama yaitu **Persamaan 3.1**.

Sementara, pembentukan larutan prekursor dari *dopant* ditunjukkan pada persamaan reaksi pada **Persamaan 3.5** berikut.



Kedua larutan prekursor kemudian dicampur ke dalam gelas kimia dan dilakukan homogenisasi dengan menggunakan *magnetic stirrer* pada temperatur kamar selama 1,5 jam. Kemudian, larutan NH₄OH dimasukkan perlahan ke dalam pada



temperatur 60° C. Reaksi yang terjadi pada ZnCl_2 terdapat pada **Persamaan 3.2** hingga **3.5** di atas, sementara untuk larutan AlCl_3 terdapat pada **Persamaan 3.6** berikut.



Setelah terbentuk endapan, hasil endapan tersebut dicuci dengan menggunakan aquades serta disaring. Langkah selanjutnya adalah memanaskan endapan pada temperatur 100° C. Setelah kering, endapan dimasukkan ke dalam *crucible* dan *disintering* pada temperatur 900° C selama 2 jam di dalam *horizontal furnace*.

Dari masing-masing material $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ hasil sintesis dengan variasi penambahan Al_2O_3 , diuji menggunakan *XRD*, *SEM*, mesin uji konduktivitas listrik (*LCR meter*), dan *DSC-TGA*.

3.5.4. Pengujian

A. Uji *XRD*

Pengujian ini dilakukan di laboratorium Karakterisasi Material departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS. Difraksi sinar-X (*X-ray Diffraction*) yang mana mesin ini ditunjukkan **Gambar 3.10**, merupakan salah satu metode karakterisasi yang dilakukan yang bertujuan untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi ataupun fasa yang mungkin terbentuk dari material hasil sintesis. Selain itu, dari pengujian ini dapat ditentukan juga perhitungan ukuran kristal serta penentuan struktur kristal. Tahapan dalam melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Sampel hasil sintesis berupa serbuk diletakkan pada holder. Serbuk ini kemudian ditekan agar padat dan kompak. Proses ini dilakukan agar diperoleh permukaan yang rata pada spesimen serbuk sehingga diperoleh data pengujian yang akurat.
2. Sampel yang telah siap diletakkan ke dalam mesin *XRD*. Kemudian dilakukan setting pengukuran sudut dengan rentang 10 hingga 90°. Secara umum, tahapan kerja dari mesin *XRD* adalah sebagai berikut:

- a. Produksi sinar-X oleh sumber (filamen).



- b. Difraksi dari sampel akibat pemberian sinar-X dari sumber.
 - c. Deteksi hasil difraksi sampel oleh detektor.
 - d. Interpretasi hasil difraksi yang ditangkap oleh detektor.
3. Interpretasi yang dihasilkan berupa data yang berbentuk grafik horizontal dengan puncak-puncak (*peak*) pada sudut tertentu.



Gambar 3.10. Mesin X-Ray Diffractometer.

B. Uji SEM-EDX

Pengujian ini dilakukan di laboratorium Karakterisasi Material departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS. *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive X-ray Spectrometry (SEM-EDX)* yang ditunjukkan **Gambar 3.11** merupakan instrumen yang digunakan untuk mengamati morfologi partikel, distribusi ukuran partikel, komposisi unsur, serta persebaran unsur dari sampel. Pengamatan morfologi dan distribusi ukuran partikel dari sampel pada penelitian ini menggunakan perbesaran sebesar 5000 dan 15000 x. Sementara, untuk mengetahui komposisi unsur dan persebarannya digunakan



alat *EDX*. Tahapan dalam melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel dalam bentuk serbuk semikonduktor dipreparasi terlebih dahulu dengan melakukan *sputter coating* agar konduksi elektron berjalan baik sehingga menghasilkan topografi yang baik pada hasil *SEM*.
2. Setelah dipreparasi, sampel dimasukkan ke dalam alat *SEM* untuk identifikasi morfologi. Hasil pengujian berupa gambar yang ditampilkan pada layar.
3. Untuk mengetahui ukuran dari partikel yang diamati, dapat digunakan pengukuran manual pada gambar menggunakan *software* dari *SEM*.
4. Persebaran dan komposisi unsur dilakukan dengan menggunakan alat *EDX*. Identifikasi persebaran dan komposisi unsur dilakukan dengan proses *mapping* pada suatu gambar yang diidentifikasi.



Gambar 3.11. Mesin *Scanning Electron Microscopy* dan *EDX* (*SEM-EDX*).

C. Uji *LCR* meter

Pengujian ini dilakukan di departemen Fisika FMIPA ITS. Alat *LCR* meter ditunjukkan oleh **Gambar 3.12**. *LCR* meter

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui sifat listrik dari material hasil sintesis yang mana dapat digunakan untuk mengukur *inductance* (L), *capacitance* (C), dan *resistance* (R). Pada penelitian ini, dilakukan pengujian dengan mengukur *resistance* (R) material untuk mengetahui konduktivitas listrik dari material. Secara umum, tahapan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel serbuk dipreparasi dengan membentuknya menjadi *pellet*.
2. Bagian permukaan *pellet* diberi *silverpaste* untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.
3. Sampel berbentuk *pellet* dicapit menggunakan *holder*.
4. *Pellet* diberi sumber listrik untuk mengetahui nilai *resistancenya*.
5. Hasil pengukuran berupa nilai *resistance* pada setiap frekuensi yang diterapkan.



Gambar 3.12. LCR Meter



D. Uji Sifat Termal

Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Energi LPPM ITS. *Differential Scanning Calorimetry-Thermogravimetric Analysis (DSC-TGA)* yang ditunjukkan oleh **Gambar 3.13**, merupakan pengujian karakterisasi material untuk mengetahui sifat termal dari sampel. Pengujian yang dilakukan untuk sampel hasil sintesis adalah pada *range* temperatur 25° C (temperatur kamar) hingga 900° C (temperatur tinggi) dengan *rate* 10°C/menit. Secara umum, tahapan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Sampel serbuk dimasukkan ke dalam *crucible* alumina dengan ukuran diameter 0,5 cm dan tinggi 0,5 cm.
2. *Crucible* ini kemudian dimasukkan ke dalam alat *DSC-TGA* dan dilakukan proses pengujian termal.

Hasil dari pengujian ini berupa kurva *TGA*. Kurva ini kemudian dianalisis untuk mengetahui sifat termal dari material yang diuji.



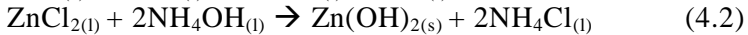
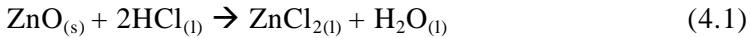
Gambar 3.13. Alat *DSC-TGA* dengan merk dagang *Mettler Toledo*.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Proses Sintesis Material

4.1.1. Proses Pembuatan Material ZnO tanpa *Doping*

Proses pembuatan material ZnO tanpa *doping* dilakukan dengan metode kopresipitasi dari serbuk ZnO dengan menggunakan larutan HCl dan NH₄OH. Massa ZnO yang digunakan adalah sebesar 5 gram. Metode kopresipitasi yang dilakukan berdasarkan **Persamaan 4.1** dan **4.2** berikut.



Perhitungan larutan yang digunakan terdapat pada **Lampiran A**. Serbuk ZnO yang dilarutkan dengan asam klorida menghasilkan larutan seperti pada **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1. Larutan ZnCl₂

Setelah dilakukan proses *stirring* dan ditambahkan larutan NH₄OH terbentuk larutan seperti pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2. Larutan hasil penambahan NH_4OH

Larutan ini disaring dan dibersihkan dengan menggunakan aquades. Endapan hasil dari penyaringan ini dipanaskan dan dilakukan proses *sintering*. Serbuk hasil *sintering* ditunjukkan oleh **Gambar 4.3.**

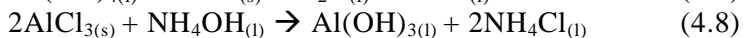
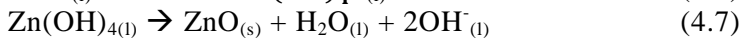
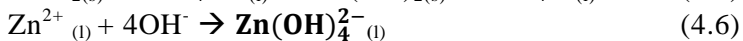
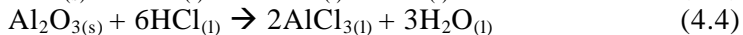
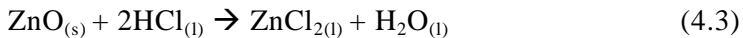


Gambar 4.3. Serbuk ZnO Tanpa *Doping*



4.1.2. Proses Pembuatan Material ZnO dengan *Doping* Al₂O₃

Proses pembuatan material ZnO dengan *doping* aluminium dilakukan dengan metode yang sama pada proses pembuatan material tanpa *doping*. Material awal yang digunakan sebagai *dopant* adalah Al₂O₃. ZnO menjadi material utama dengan massa yang digunakan sebesar 5 gram untuk setiap sampel. Perhitungan masing-masing massa *dopant* serta jumlah larutan yang digunakan terdapat pada **Lampiran A**. Proses *doping* dilakukan berdasarkan **Persamaan 4.3** hingga **4.8** berikut.



Serbuk ZnO yang dilarutkan dengan asam klorida akan menghasilkan larutan seperti pada sintesis ZnO tanpa *doping*. Material Al₂O₃ yang dilarutkan dengan asam klorida menghasilkan larutan berwarna bening (Vogel, 1941). Larutan AlCl₃ ini dicampur dengan larutan ZnCl₂ dan dilakukan proses *stirring*. Pada proses penambahan NH₄OH, terbentuk larutan yang terdapat pada **Gambar 4.4** di bawah ini.



Gambar 4.4. Larutan ZnO dengan *Doping*.



Endapan yang telah dikeringkan dan diberikan perlakuan *sintering* ditunjukkan oleh **Gambar 4.5** yang mana material hasil sintesis ini berupa serbuk dengan warna yang berbeda. Perbedaan warna ini diindikasikan karena sifat dari ZnO yang termokromik sehingga mengalami perubahan warna ketika diberikan perlakuan *sintering*.



Gambar 4.5. Pengamatan Visual Serbuk ZnO dengan Penambahan Al_2O_3 : (a) 1%; (b) 2%; (c) 3%; dan (d) 4%.

Serbuk hasil sintesis tersebut kemudian ditumbuk dengan *mortar* untuk memperoleh serbuk yang halus. Sampel yang diuji diberi keterangan sampel seperti yang terdapat pada **Tabel 4.1** berikut.



Tabel 4.1. Sampel yang Diuji.

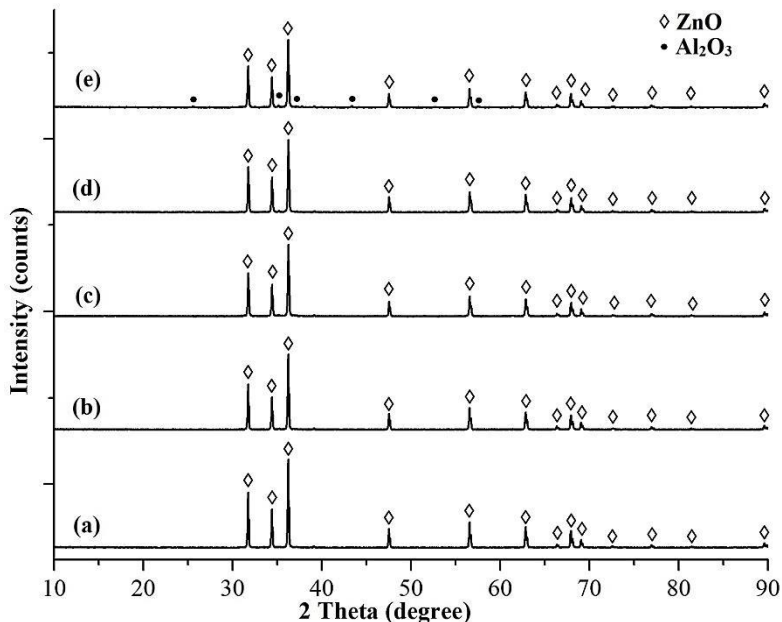
| Nomor | Nama Sampel | Jumlah <i>Doping</i> | Temperatur <i>Sintering</i> (°C) |
|-------|-------------|----------------------|----------------------------------|
| 1. | 0 / 900 | Tanpa <i>doping</i> | 900 |
| 2. | 0.01/900 | 1 <i>at. %</i> | 900 |
| 3. | 0.02/900 | 2 <i>at. %</i> | 900 |
| 4. | 0.03/900 | 3 <i>at. %</i> | 900 |
| 5. | 0.04/900 | 4 <i>at. %</i> | 900 |

Untuk mengetahui morfologi, komposisi, sifat listrik, dan sifat termal dari sampel dilakukan pengujian menggunakan beberapa instrumen antara lain *XRD*, *SEM-EDX*, *LCR meter*, dan *DSC-TGA*.

4.2. Analisis Kurva Hasil Pengujian *XRD*

Pengujian *X-ray Diffraction (XRD)* dilakukan untuk mengetahui kristalinitas, perubahan fasa yang terjadi serta fasa yang terbentuk akibat dari penambahan Al_2O_3 . Pada pengujian ini digunakan radiasi dari $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$) dengan nilai 2θ dari 10° hingga 90°

Pada grafik hasil pengujian, diperoleh beberapa *peak* tertinggi untuk masing-masing sampel. *Peak* dengan tiga intensitas tertinggi dari keseluruhan sampel berada pada rentang 2θ sebesar 31° hingga 37° . Grafik dari pengujian *XRD* untuk keseluruhan sampel ditunjukkan **Gambar 4.6** berikut.



Gambar 4.6. Hasil Pengujian XRD untuk Masing-Masing Sampel: (a) Tanpa *Doping*; (b) *Doping* 1%; (c) *Doping* 2%; (d) *Doping* 3%; dan (e) *Doping* 4%.

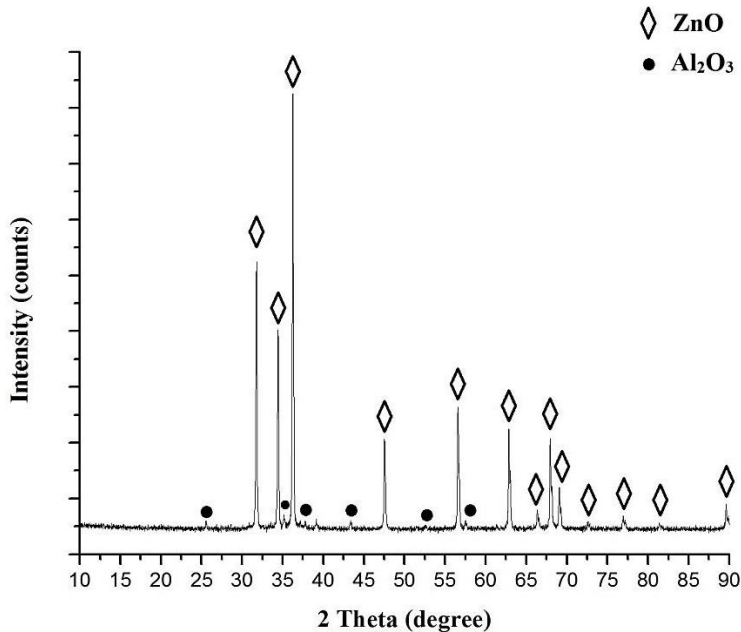
Tiga *peak* atau puncak tertinggi pada **Gambar 4.6** secara umum berada pada nilai 2 theta (2θ) sebesar 31 hingga 37 derajat. Untuk sampel tanpa *doping* (0%), tiga puncak tertinggi secara berurutan berada pada 2θ sebesar 36.2343, 31.7476, dan 34.4151 derajat. Hasil ini kemudian dianalisis dengan menggunakan *software High Score Plus* dan *ICDD Card Database* yang mana keseluruhan *peak* tersebut sesuai dengan *PDF card* 01-078-3322. Hasil identifikasi ini menunjukkan fasa tunggal dari ZnO dengan struktur kristal *wurtzite Hexagonal Close Packed (HCP)*. Ketiga puncak tertinggi tersebut secara berurutan menunjukkan indeks bidang (101), (100), dan (002) dengan intensitas tertinggi berada pada puncak dengan indeks bidang (101).



Pada sampel dengan *doping* sebesar 1%, tiga *peak* tertinggi secara berurutan terdapat pada 2θ sebesar 36.2382, 31.7524, dan 34.4178 derajat. Pada **Gambar 4.6** tersebut, tidak ditemukan adanya *peak* impuritas serta munculnya fasa baru akibat *doping* sebesar 1%. Untuk sampel dengan *doping* sebesar 2%, tiga *peak* tertingginya adalah 36.2570, 31.7725, dan 34.4376 derajat. Pada sampel ini juga tidak terdeteksi adanya fasa baru yang terbentuk serta tidak terlihat adanya *peak* impuritas seperti yang terlihat pad

Sementara, untuk hasil pengujian *XRD* dari sampel dengan *doping* sebesar 3%, nilai tiga puncak tertingginya berada pada 2θ sebesar 36.2571, 31.7738, dan 34.4335 derajat dan sampel dengan *doping* sebesar 4%, tiga *peak* tertingginya secara berurutan berada pada 36.2332, 31.7457, dan 34.4193 derajat.

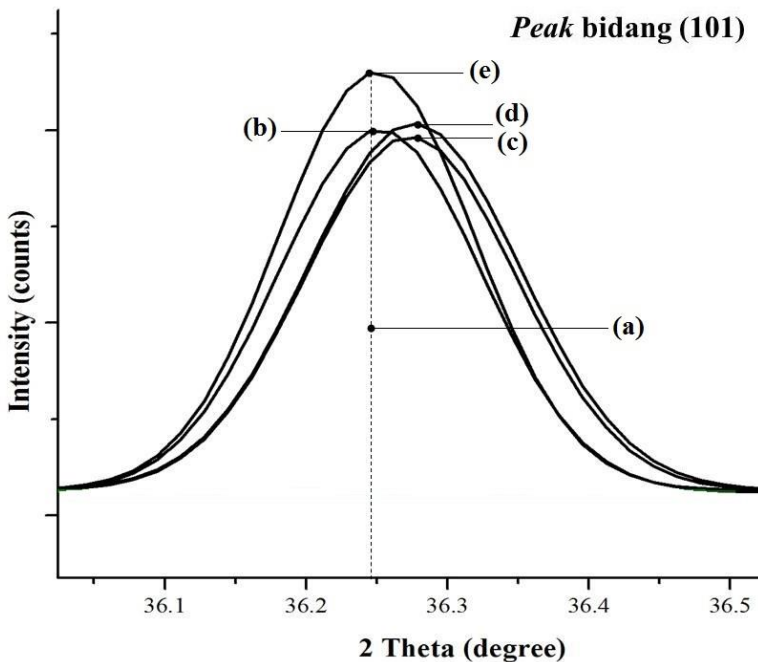
Dengan melakukan analisis menggunakan *software High Score Plus* dan *ICDD Card Database*, puncak tertinggi dari masing-masing sampel secara keseluruhan menunjukkan fasa tunggal yang sama dengan material tanpa adanya *doping* yaitu ZnO dengan struktur *wurtzite*-heksagonal. Namun, pada sampel dengan komposisi *doping* 4% ini teridentifikasi adanya *peak* lain yang menunjukkan fasa lain. *Peak* ini berada pada 25.5477, 35.1179, 37.7916, 43.3374, 52.6206, dan 57.4650 derajat yang terlihat pada **Gambar 4.7.** berikut.



Gambar 4.7. Hasil XRD Sampel dengan *Doping* 4%.

Beberapa *peak* tersebut memiliki intensitas yang sangat kecil dan setelah dilakukan proses identifikasi beberapa puncak tersebut sesuai dengan *ICDD Card* dengan nomor PDF-01-076-7774 yang mana menunjukkan beberapa puncak tertinggi dari fasa α -Al₂O₃. Fasa ini muncul diindikasikan karena beberapa hal seperti batas kelarutan Al dalam kisi ZnO, reaksi oksidasi atau reaksi sampingan, serta kemungkinan tidak larutnya sebagian kecil bahan utama dalam HCl. Dari puncak tertinggi untuk material dengan *doping*, terlihat terjadinya pergeseran puncak jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping*. Untuk mengetahui pergeseran *peak* pada *peak* tertinggi yaitu pada bidang (101), dilakukan proses *zooming* dan *fitting* menggunakan metode Gaussian menggunakan *software Origin Pro 2016* yang hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 4.8** berikut.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.8. Pergeseran Nilai *Peak* untuk Puncak Tertinggi pada Bidang (101): (a) Tanpa *Doping*; (b) *Doping* 1%; (c) *Doping* 2%; (d) *Doping* 3%; dan (e) *Doping* 4%.

Dari gambar tersebut, terjadi pergeseran puncak untuk nilai *doping* pada bidang tertinggi yaitu bidang (101). Pada bidang gambar di atas, terlihat bahwa secara umum pergeseran terjadi ke derajat yang lebih tinggi dengan bertambahnya nilai *doping*. Sementara untuk sampel dengan nilai *doping* 4% terlihat pergeseran puncak yang tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan nilai *doping* yang lain. Hal ini diindikasikan karena adanya fasa lain yang menyebabkan pergeseran puncak tidak terlalu terlihat. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jeong, et al. (2008) dan Zhang, et al. (2014), pergeseran puncak menuju ke derajat yang lebih tinggi mengindikasikan terjadinya



penggabungan ion *dopant* Al^{3+} yang memiliki jari-jari lebih kecil dibandingkan dengan ion Zn^{2+} ke dalam *lattice* (kisi) dari ZnO karena mekanisme *doping*. Sementara, pergeseran puncak ke derajat yang lebih rendah dikarenakan munculnya tegangan *tensile* yang menyebabkan distorsi pada kisi.

4.3. Analisis *Average Crystal Size* dan *Micro-strain* dari Hasil Pengujian XRD

Dari *fitting* yang dilakukan dengan metode Gaussian, terlihat adanya perubahan FWHM (*broadening*) pada tiga puncak tertinggi akibat dari penambahan nilai *doping*. *Peak broadening* ini dapat disebabkan oleh beberapa indikasi seperti perubahan *crystallite size* dan *microstrain* dari sampel yang diuji. Untuk itu dilakukan analisis mengenai dua indikasi tersebut.

Nilai *crystallite size* rata-rata (D) pada serbuk ZnO dengan *doping* ditentukan dengan menggunakan persamaan *Scherrer* pada **Persamaan 4.9** berikut.

$$D = \frac{\kappa\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (4.9)$$

Konstanta D menunjukkan besarnya *crystallite size* rata-rata, sementara κ merupakan konstanta *Scherrer* dengan nilai 0.9 untuk struktur heksagonal. λ yang digunakan dalam perhitungan merupakan nilai panjang gelombang dari Cu-K α ($\lambda = 1.54060\text{\AA}$). β adalah FWHM bidang yang ditentukan (dalam satuan radian) yang telah dilakukan koreksi menggunakan *correction factor* dari instrumen. Nilai tersebut diperoleh dari akar pengurangan β^2_{sampel} dan $\beta^2_{\text{instrumen}}$ yang ditunjukkan **Persamaan 4.10**. Persamaan ini digunakan untuk identifikasi menggunakan metode Gaussian.

$$\beta = \sqrt{(\beta^2_{\text{sampel}}) - (\beta^2_{\text{instrumen}})} \quad (4.10)$$



Nilai *crystallite size* yang diukur adalah nilai dari bidang dengan intensitas tertinggi yaitu bidang (101). Hasil perhitungan *crystallite size* terdapat pada **Tabel 4.2** berikut.

Tabel 4.2. Nilai *Crystallite Size* untuk Setiap Sampel pada *Peak* (101) setelah Dilakukan *Curve Fitting*.

| Sampel | 2θ (°) | β (radian) | D (nm) |
|--------------|---------------|------------------|---------|
| Tanpa doping | 36.24981 | 0.00163845 | 89.0433 |
| Doping 1% | 36.25236 | 0.00180494 | 80.8304 |
| Doping 2% | 36.27392 | 0.00200253 | 72.8593 |
| Doping 3% | 36.27614 | 0.0020508 | 71.1449 |
| Doping 4% | 36.24931 | 0.00216532 | 67.377 |

Nilai *crystallite size* tertinggi terdapat pada ZnO yang tidak diberikan *doping* dengan nilai 89.0433 nm, sementara yang terendah adalah ZnO dengan *doping* 4% yaitu 67.377 nm. Dari tabel tersebut, semakin banyak komposisi *doping* maka nilai rata-rata *crystallite size* akan semakin turun. Penelitian yang dilakukan oleh Mallika, et al. (2014) menunjukkan hasil yang serupa yang mana dengan perhitungan menggunakan persamaan *Debye-Scherrer* juga menghasilkan penurunan nilai *crystallite size* rata-rata. Dengan semakin meningkatnya nilai *doping* secara simultan akan meningkatkan nilai FWHM dan pada umumnya terjadi penurunan intensitas pada *peak*. Hal ini mengindikasikan kristalinitas dari ZnO mengalami penurunan akibat adanya *dopant* yang masuk ke dalam kisi ZnO. Selain itu, menurut penelitian yang dilakukan oleh Ghazai, et al. (2016), penurunan ukuran



kristal akibat peningkatan dari konsentrasi Al, disebabkan oleh substitusi ion Al pada Zn dalam kisi ZnO. Al^{3+} (0.39 \AA) memiliki jari-jari ionik yang lebih kecil dibandingkan dengan Zn^{2+} (0.6 \AA) yang menyebabkan *unit cell* dari ZnO menyusut (Shui, 2009).

Pada sub bab ini juga dilakukan analisis mengenai besarnya nilai *microstrain* yang ada akibat proses *doping*. Perhitungan untuk melakukan identifikasi adanya *microstrain* diketahui melalui **Persamaan 4.11** berikut.

$$\text{Micro-strain } (\epsilon) = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (4.11)$$

Konstanta ϵ merupakan nilai *microstrain* dan β adalah FWHM pada bidang (101) dalam satuan radian. Dari perhitungan yang dilakukan diperoleh nilai *microstrain* yang ditunjukkan pada **Tabel 4.3** berikut.

Tabel 4.3. Nilai *Microstrain* pada Bidang (101) setelah Dilakukan Proses *Fitting*.

| Sampel | 2θ | β (radian) | $\tan \theta$ | $\epsilon (10^{-3})$ |
|---------------------|-----------|---------------------|---------------|----------------------|
| Tanpa <i>doping</i> | 36.24981 | 0.001638 | 0.32733166 | 1.251 |
| 1% | 36.25236 | 0.001805 | 0.3273562 | 1.378 |
| 2% | 36.27392 | 0.002003 | 0.32756452 | 1.528 |
| 3% | 36.27614 | 0.002051 | 0.32758597 | 1.565 |
| 4% | 36.24931 | 0.002165 | 0.32732683 | 1.654 |

Dari analisis yang dilakukan, nilai dari *microstrain* semakin mengalami peningkatan ketika nilai *doping* bertambah. Penelitian yang dilakukan oleh Gautam, et al. (2015) menunjukkan naiknya nilai *micro-strain* akibat dari



meningkatnya komposisi *doping* aluminium. Hal ini mengindikasikan bahwa Al bergabung ke dalam kisi ZnO. Selain itu dari penelitian sebelumnya juga menjelaskan jika akibat dari meningkatkatnya jumlah Al di dalam ZnO dapat menyebabkan *mismatch* pada kisi ZnO sehingga muncul *microstrain* (Mallika, et al., 2014).

Dari hasil *XRD*, dapat diketahui juga perbandingan c / a untuk *lattice parameters* dari masing-masing sampel. Hal ini dilakukan untuk mengetahui mekanisme *doping* aluminium ke struktur ZnO. Perhitungan *lattice parameters* untuk a dan c dari struktur heksagonal (*wurtzite*) dilakukan dengan menggunakan persamaan 4.12 dan 4.13 berikut.

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3}\sin\theta_{(100)}} \quad (4.12)$$

$$c = \frac{\lambda}{\sin\theta_{(002)}} \quad (4.13)$$

Dari persamaan tersebut, konstanta a adalah dan c merupakan nilai *lattice parameter*. Untuk λ yang digunakan dalam perhitungan merupakan nilai panjang gelombang dari Cu-K α ($\lambda = 1.54060\text{\AA}$), Sementara $\theta_{(100)}$ dan $\theta_{(002)}$ masing-masing merupakan nilai θ dalam satuan derajat pada indeks (100) dan (002). Nilai *lattice parameters* untuk masing-masing nilai *dopant* terdapat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4. Nilai a dan c untuk *Lattice Parameters*

| Sample | <i>Lattice Parameters</i> | | |
|---------------------|---------------------------|----------|----------|
| | a (Å) | c (Å) | c / a |
| Tanpa <i>Doping</i> | 3.250876 | 5.205539 | 1.601273 |
| <i>Doping</i> 1% | 3.250486 | 5.205179 | 1.601354 |
| <i>Doping</i> 2% | 3.24837 | 5.202046 | 1.601433 |
| <i>Doping</i> 3% | 3.248115 | 5.202667 | 1.60175 |
| <i>Doping</i> 4% | 3.250861 | 5.205613 | 1.601303 |



Pada **Tabel 4.4** terlihat nilai *lattice parameters* untuk a dan c secara umum berada pada nilai 3.25 Å dan 5.25 Å yang mana mendekati nilai dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya serta mendekati nilai teori kisi ZnO dengan struktur *wurtzite*. Dari tabel, nilai kisi cenderung mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan ketika mengalami penambahan jumlah *dopant*.

Pada *doping* sebesar 3% nilai c dari *lattice parameters* mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan *doping* 2%. Selain itu, pada komposisi *doping* 4% baik nilai a dan c juga mengalami kenaikan yang juga tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan jumlah *doping* lainnya, sementara nilai a dari sampel 4% mengalami sedikit penurunan jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping*.

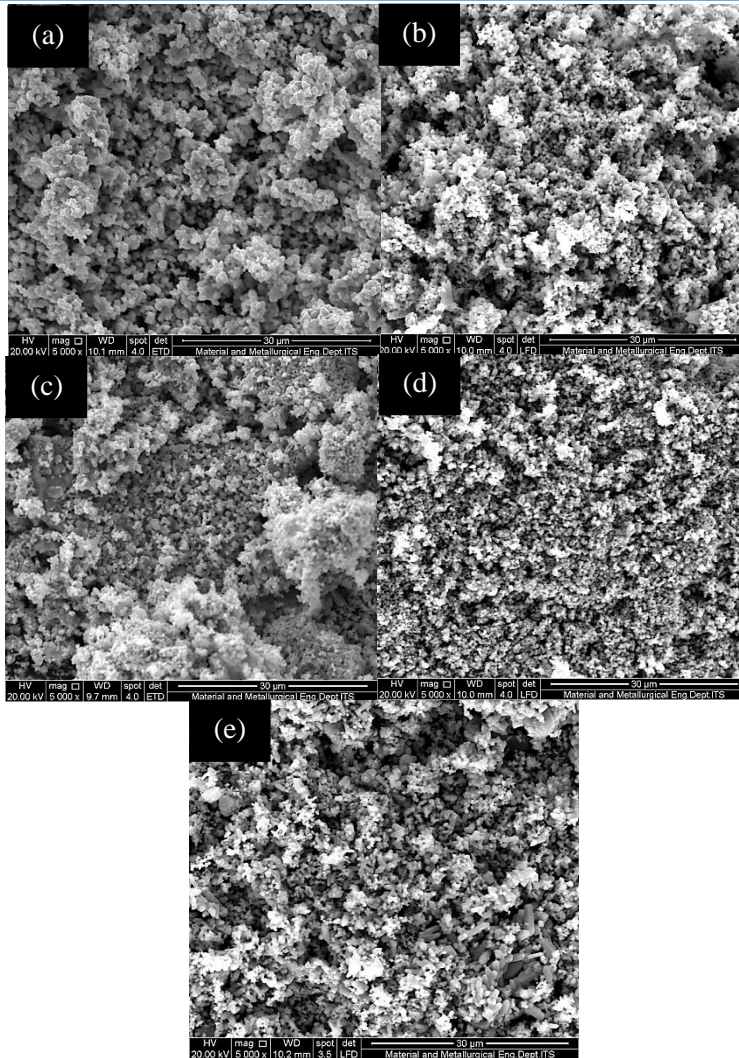
Jumlah penambahan Al sebagai *dopant* menghasilkan *lattice disorders* (Chen, et al., 2008). Dengan naiknya substitusi Al dengan Zn *lattice parameters* a dan c akan mengalami penurunan akibat dari jari-jari Al yang lebih kecil jika dibandingkan dengan Zn yang menghasilkan kontraksi kisi. Sedangkan naiknya nilai *lattice parameters* diindikasikan karena sejumlah Al yang belum tergabung dan berada pada kisi ZnO yang mana mengisi sisi Zn^{2+} (Xiangjun, et al., 2008). Menurut penelitian Kayani, et al. (2015) variasi nilai parameter kisi ini juga diindikasikan karena adanya *dangling bonds* pada permukaan ZnO. Sementara, perubahan rasio kisi c/a yang tidak terlalu signifikan menunjukkan bahwa bentuk sel unit tetap pada struktur heksagonal (Akdag, et al., 2016).

Dari hasil analisis XRD diketahui jika *doping* aluminium berhasil dilakukan pada material ZnO. Komposisi penambahan Al_2O_3 juga berpengaruh terhadap proses *doping*. Beberapa parameter yang dipengaruhi oleh penambahan Al_2O_3 antara lain *crystallite size*, *microstrain*, dan *lattice parameters*.



4.4. Analisis Morfologi dan Persebaran Komposisi *Dopant* dari Pengujian SEM-EDX

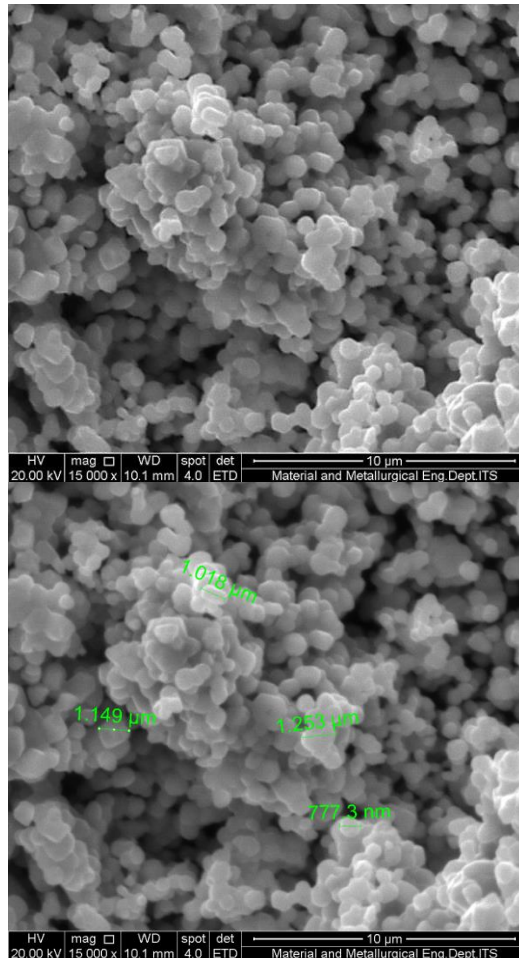
Untuk mengetahui pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap morfologi dari serbuk ZnO , maka dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengamatan morfologi dan bentuk partikel dari pengujian SEM ini dilakukan pada perbesaran 5000 x dan 15000 x. Untuk mengetahui ukuran partikel yang terbentuk, dilakukan pengukuran dengan menggunakan *software* yang terdapat pada peralatan SEM. Selain itu, untuk mengetahui distribusi dan komposisi unsur *doping* yaitu aluminium, dilakukan pengujian dengan menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDX). Pada **Gambar 4.9** berikut, terlihat morfologi dari material *Al-doped ZnO* untuk masing-masing nilai *doping*.



Gambar 4.9. Morfologi dari Serbuk *Al-doped ZnO* pada Perbesaran 5000x dengan Nilai *Doping*: (a) 0%; (b) 1%; (c) 2%; (d) 3%; dan (e) 4%



Untuk mengetahui persebaran dan ukuran partikel yang lebih jelas, dilakukan perbesaran dan pengukuran pada 15000 x untuk masing-masing sampel.

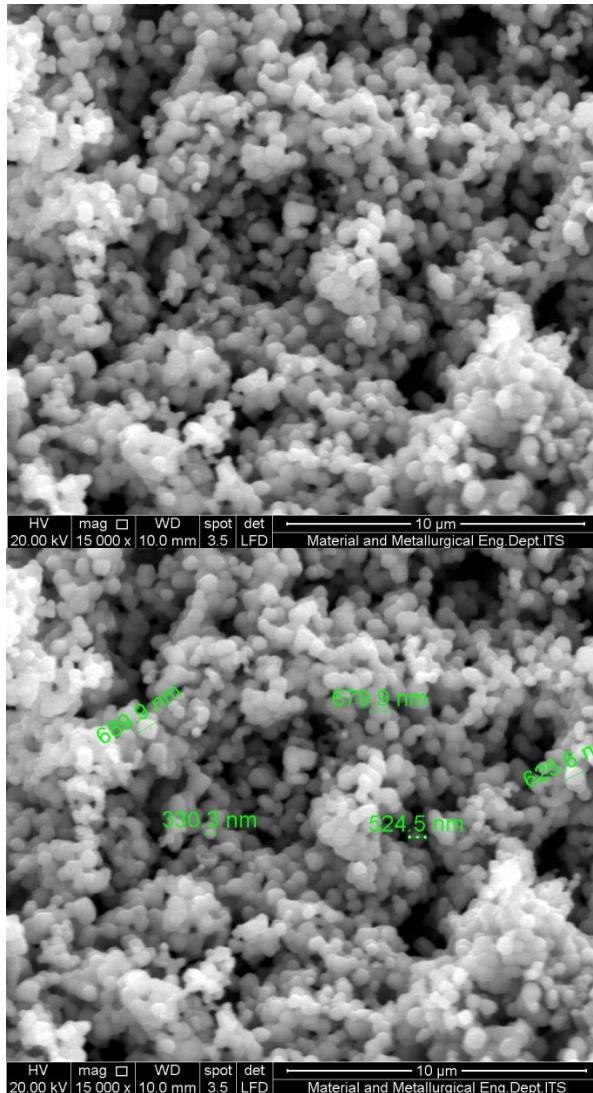


Gambar 4.10. Morfologi dan Ukuran Partikel dari Serbuk ZnO tanpa *Doping* dengan Perbesaran 15000 x.



Pada **Gambar 4.10**, terlihat morfologi dari serbuk ZnO tanpa *doping*. Dari analisis yang dilakukan pada hasil gambar tersebut, terlihat jika bentuk partikel dari sampel tersebut adalah *sphere* yang menyatu satu sama lain sehingga membentuk susunan lebih padat. Partikel tersebut terlihat tersebar merata dengan ukuran yang beragam dari 777 nm hingga 1.253 μm dengan nilai rata-rata ukuran partikelnya sekitar 1.049 μm . Dari gambar juga terlihat warna yang seragam dan tidak terlihat adanya partikel impuritas. Gambar tersebut mirip dengan penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti dalam sintesis ZnO nanopartikel seperti penelitian yang dilakukan oleh Raoufi (2013), yang mana melakukan sintesis ZnO nanopartikel dengan menggunakan metode presipitasi.

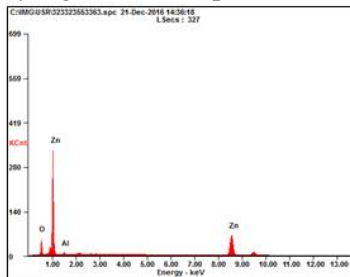
Selanjutnya, dilakukan pengamatan dan analisis pada sampel dengan *doping* sebesar 1% hingga 4%. Morfologi dan distribusi partikel dari sampel dengan nilai *doping* sebesar 1% terlihat pada **Gambar 4.11** berikut.



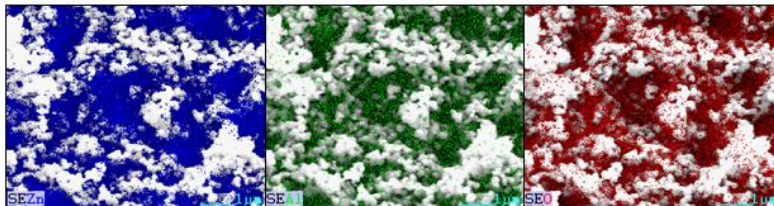
Gambar 4.11. Hasil *SEM* dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 1% pada Perbesaran 15000 x.



Pada gambar **Gambar 4.11** terlihat morfologi dari ZnO dengan *doping* 1% pada perbesaran 15000 x. Partikel yang terbentuk memiliki bentuk *sphere* yang terlihat lebih kecil dengan persebaran bentuk partikel yang merata dan terlihat seragam. Partikel memiliki ukuran sekitar 320 nm hingga 689 nm dengan ukuran rata-rata sekitar 570 nm. Distribusi dari unsur dan komposisi pada *doping* 1% ditunjukkan pada **Gambar 4.12** berikut yang mana merupakan hasil pengujian *EDX*.

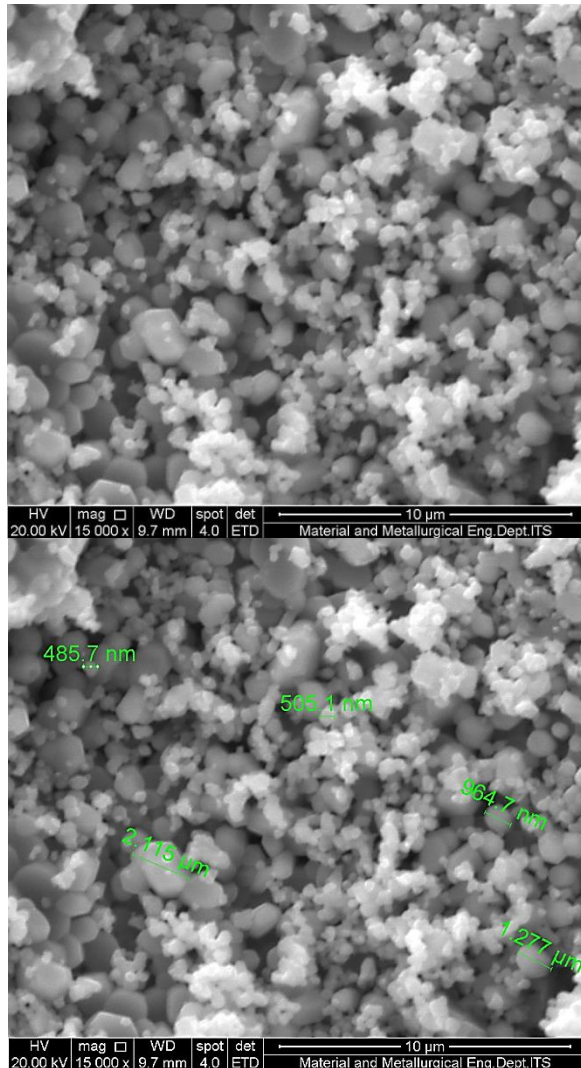


| Element | Wt% | At% |
|---------|------------|-------|
| OK | 13.44 | 37.84 |
| AlK | 02.56 | 04.28 |
| ZnK | 84.00 | 57.88 |
| Matrix | Correction | ZAF |



Gambar 4.12. Hasil *EDX* dari serbuk ZnO dengan *doping* 1%.

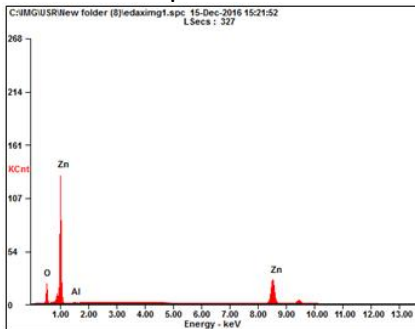
Hasil *EDX* menunjukkan bahwa komposisi unsur yang terdapat pada daerah yang dilakukan pengujian terdiri dari Zn, Al, dan O. Warna biru menunjukkan persebaran unsur Zn, sementara warna hijau dan merah masing-masing menunjukkan persebaran unsur Al dan O. Dari proses pemetaan yang mana ditunjukkan dengan warna hijau, terlihat unsur aluminium tersebar dengan merata.



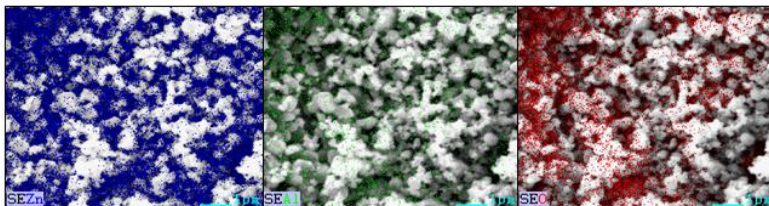
Gambar 4.13. Hasil SEM dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 2% pada Perbesaran 15000 x.



Morfologi sampel serbuk ZnO dengan *doping* 2% pada perbesaran 15000 x ditunjukkan oleh **Gambar 4.13**. Gambar tersebut menunjukkan bahwa partikel terlihat memiliki bentuk *sphere* dengan ukuran yang beragam. Beberapa bagian gambar juga menunjukkan partikel yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel dengan *doping* 1%. Hasil pengukuran menunjukkan ukuran partikel beragam dengan bentuk bulat dan poligonal dari 485.7 nm hingga 2.115 μm dengan ukuran rata-rata sebesar 1.069 μm .

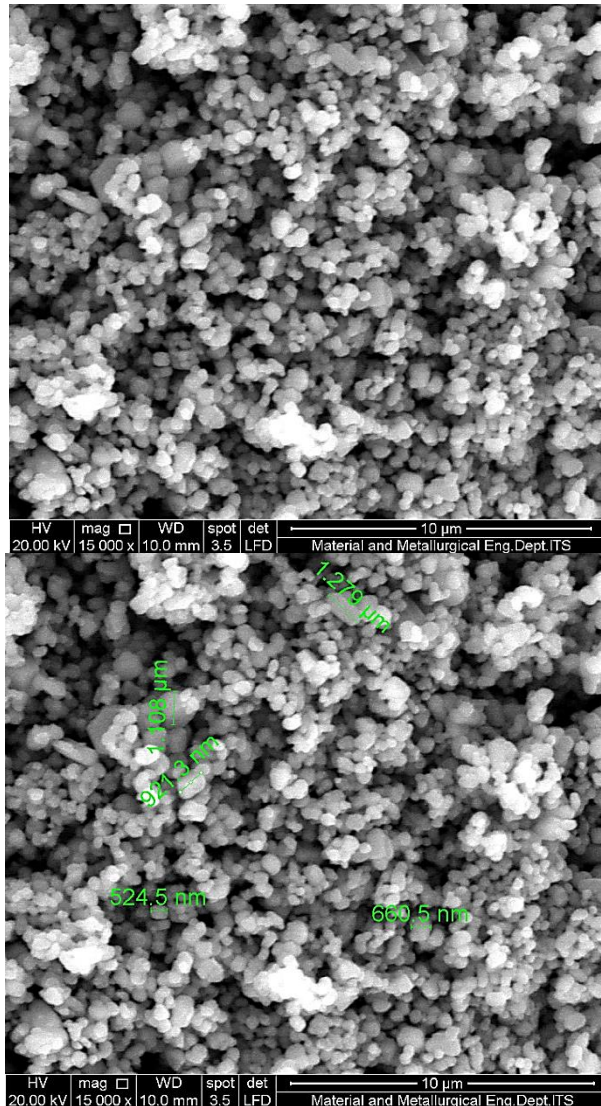


| Element | Wt% | At% |
|---------|------------|-------|
| OK | 13.36 | 38.36 |
| AlK | 00.75 | 01.29 |
| ZnK | 85.89 | 60.36 |
| Matrix | Correction | ZAF |



Gambar 4.14. Hasil *EDX* dari serbuk ZnO dengan *doping* 2%.

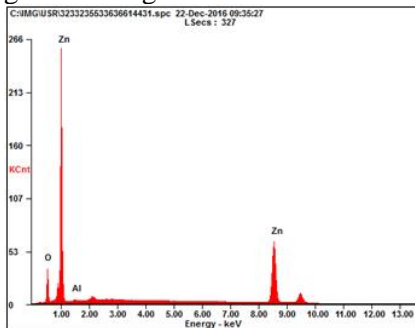
Untuk hasil *EDX* pada sampel dengan *doping* 2% menunjukkan komposisi yang terdiri dari unsur Zn, Al, dan O. Persebaran unsur aluminium yang ditunjukkan bintang hijau terlihat merata pada **Gambar 4.14** tersebut.



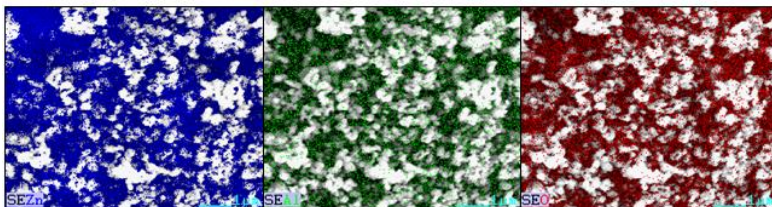
Gambar 4.15. Hasil SEM dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 3% pada Perbesaran 15000 x.



Gambar 4.15 menunjukkan hasil *SEM* untuk material dengan *doping* 3%. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa partikel tersebar merata dengan bentuk *sphere* yang ukurannya cukup beragam dari 524 nm hingga 1.279 μm dengan ukuran rata-rata partikel sebesar 898.26 nm. Sedangkan, untuk hasil *EDX* dari sampel ini ditunjukkan pada **Gambar 4.16** di bawah ini. Hasil ini menunjukkan bahwa komposisi partikel terdiri dari Zn, Al, dan O dengan persebaran unsur Al merata yang mana ditunjukkan pada gambar dengan titik-titik berwarna hijau.



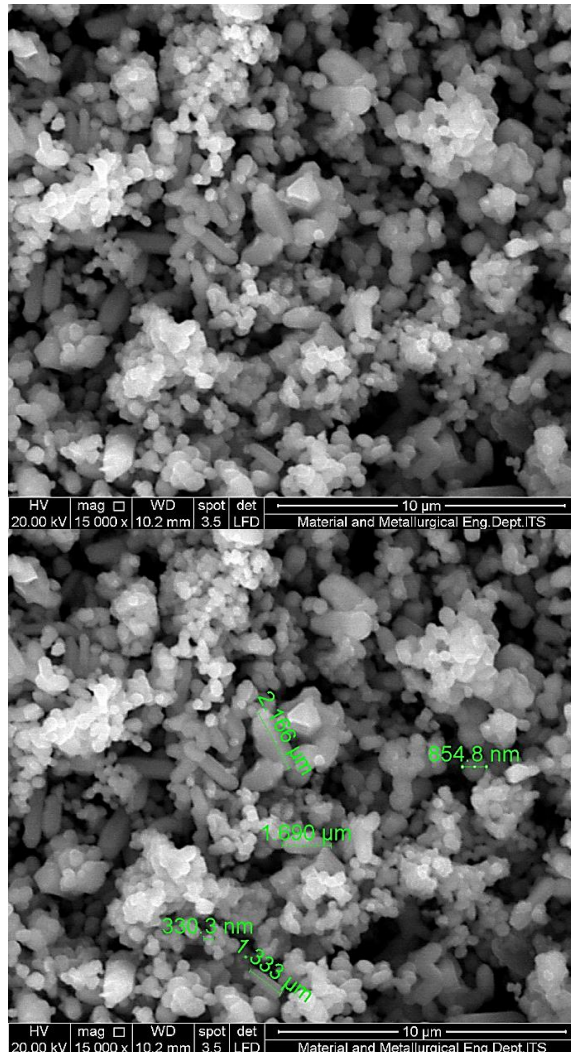
| Element | Wt% | At% |
|---------|------------|-------|
| OK | 12.07 | 35.45 |
| AlK | 01.32 | 02.30 |
| ZnK | 86.61 | 62.25 |
| Matrix | Correction | ZAF |



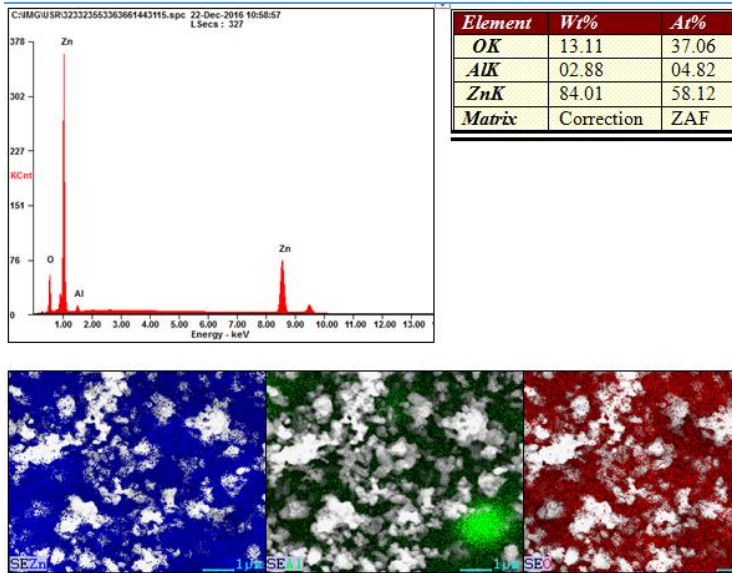
Gambar 4.16. Hasil *EDX* dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 3%.

Untuk morfologi sampel dengan *dopant* sebesar 4% pada perbesaran 15000 x ditunjukkan oleh **Gambar 4.17**. Distribusi dari bentuk partikel terlihat beragam. Dari pengukuran yang dilakukan, ukuran partikel juga beragam dari yang terkecil sekitar 330 nm hingga yang terbesar sekitar 2.166 μm dengan ukuran diameter partikel rata-rata sebesar 1.276 μm .

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.17. Hasil SEM dan Pengukuran Partikel dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 4% pada Perbesaran 15000 x.



Gambar 4.18. Hasil *EDX* dari Serbuk ZnO dengan *Doping* 4%.

Hasil *EDX* untuk sampel *doping* 4% terlihat pada **Gambar 4.18**. Dari hasil *mapping* komposisi unsurnya terdiri dari Zn, Al, dan O serta distribusi *doping* Al terlihat merata. Namun, pada gambar terlihat adanya warna hijau muda yang terkumpul pada satu wilayah tertentu yang mengindikasikan adanya kemungkinan fasa α -Al₂O₃.

Dari hasil *SEM* dan *EDX* untuk keseluruhan sampel, bentuk partikel secara umum adalah *sphere* dengan berbagai ukuran. Secara umum unsur *doping* yaitu aluminium terlihat tersebar merata. Hal ini sesuai dengan beberapa penelitian yang menyatakan bahwa metode kopresipitasi akan menghasilkan persebaran *dopant* yang homogen. Pada sampel dengan *doping* 1%, terjadi penurunan ukuran partikel jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping* yang mana sesuai dengan pengukuran ukuran kristal yang dilakukan. Pada sampel dengan *doping* 2% hingga 4% menunjukkan ukuran partikel yang terlihat lebih besar

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



jika dibandingkan dengan *doping* 1%. Hal ini diindikasikan karena terjadinya aglomerasi pada partikel. Aglomerasi dapat disebabkan karena berbagai faktor. Parameter-parameter dari proses kopresipitasi seperti *raw materials*, temperatur reaksi, pH larutan, laju titrasi, bahkan laju stirring dapat mempengaruhi hasil akhir dari *precipitate* (Wang, et al., 2003).

4.5. Analisis Pengaruh *Doping* terhadap Sifat Listrik *Al-doped ZnO*

Untuk mengetahui pengaruh penambahan Al_2O_3 terhadap sifat listrik dari serbuk hasil sintesis, dilakukan pengujian dengan menggunakan alat uji *LCR meter*. Sifat listrik yang dianalisis adalah konduktivitas listrik. Sampel berupa serbuk dibentuk menjadi *pellet* berbentuk silinder pipih yang kemudian pada kedua permukaan dilapisi *silver paste* yang ditunjukkan pada **Gambar 4.19** berikut.



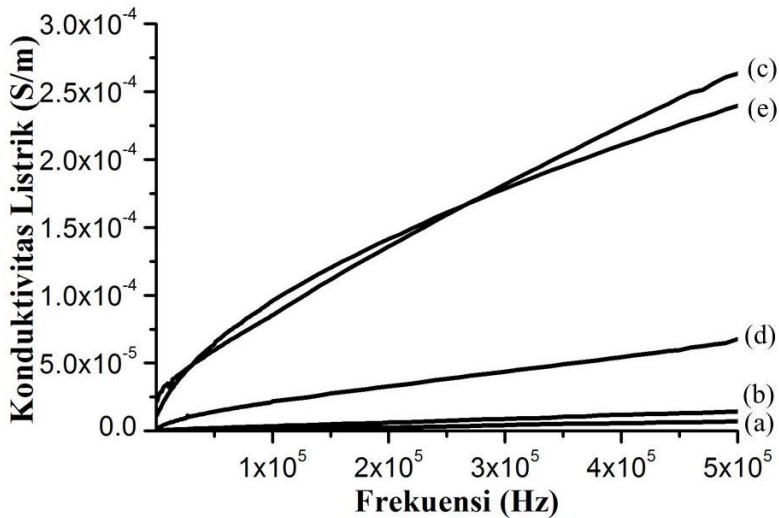
Gambar 4.19. Sampel yang telah dikompaksi dan dilapisi *silver paste*.

Pengukuran dilakukan terhadap resistivitas dari tiap sampel. Data hasil pengujian yang diperoleh berupa data berupa nilai resistansi untuk masing-masing sampel pada frekuensi tertentu. Frekuensi yang digunakan dalam pengujian ini berada pada rentang 1 kHz hingga 500 kHz. Data ini kemudian dikonversi ke dalam bentuk grafik konduktivitas listrik terhadap frekuensi. Konduktivitas listrik dihitung melalui **Persamaan 4.14**.

$$\sigma = \frac{1}{R A} \quad (4.14)$$



σ merupakan konduktivitas listrik dari sample, l adalah jarak antar sumber arus, R yang digunakan adalah hambatan yang terukur untuk tiap frekuensi, dan A adalah luas permukaan yang tegak lurus terhadap sumber arus. **Gambar 4.20** berikut menunjukkan hasil perhitungan yang dilakukan.



Gambar 4.20. Grafik Konduktivitas Listrik terhadap Frekuensi untuk Masing-Masing Jumlah *Doping*: (a) Tanpa *doping*; (b) *doping* 1%; (c) *doping* 2%; (d) *doping* 3%; dan (e) *doping* 4%.

Dari gambar tersebut, terlihat seiring penambahan jumlah Al_2O_3 berpengaruh terhadap konduktivitas listrik dari ZnO . Pada ZnO tanpa adanya *doping*, nilai konduktivitas listrik terlihat sangat rendah pada setiap frekuensinya. Nilai konduktivitas listrik dari sampel tanpa doping berada pada angka 10^{-7} hingga $10^{-6} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Namun, dengan adanya *doping* dari Al, nilai konduktivitas ZnO mengalami peningkatan yang cukup signifikan.

Konsentrasi dari *native point defects* dan impuritas secara signifikan dapat mempengaruhi sifat listrik dari material



semikonduktor. Hal ini membuktikan *impurities* berupa *dopant* Al mempengaruhi konduktivitas listrik tipe-n dari material semikonduktor ZnO. Pada hasil pengujian untuk sampel dengan nilai *doping* 1%, konduktivitas dari material ZnO mengalami kenaikan. Dengan naiknya nilai frekuensi, konduktivitas listrik dari sampel ini juga mengalami kenaikan. Nilai konduktivitas dari sampel dengan *doping* 1% berada pada $2.2 \times 10^{-7} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ untuk frekuensi 1 kHz hingga $1.411 \times 10^{-5} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pada frekuensi 500 kHz.

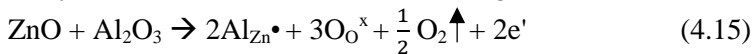
Untuk sampel dengan *doping* 2% nilai konduktivitas listrik menunjukkan kenaikan konduktivitas listrik yang sangat signifikan hingga 2 orde pada frekuensi 500 kHz jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping*. Pada frekuensi 500 kHz konduktivitas listrik dari sampel ini dapat mencapai $2.6 \times 10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Kemudian untuk material dengan *doping* 3% menunjukkan peningkatan konduktivitas listrik jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping* dan *doping* 1%. Namun, nilai konduktivitas listrik dari sampel ini berada di bawah sampel *doping* 2%. Nilai konduktivitas listrik dari material ini berada pada $1.65 \times 10^{-6} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pada frekuensi 1 kHz hingga $6.75 \times 10^{-5} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pada frekuensi 500 kHz.

Sampel dengan *doping* 4% menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping*, *doping* 1%, dan 3%. Nilai konduktivitas sampel *doping* 4% ini berada pada nilai $1.17 \times 10^{-5} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pada frekuensi 1 kHz hingga $2.39 \times 10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pada 500 kHz. Nilai konduktivitas listrik dari sampel dengan *doping* 4% memiliki nilai konduktivitas listrik yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *doping* 2% pada frekuensi sekitar 50 kHz hingga 250 kHz.

Dari keseluruhan sampel, terjadi penurunan nilai resistivitas dan peningkatan nilai konduktivitas listrik jika dibandingkan dengan sampel tanpa *doping*. Hal ini sesuai dengan



beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Di dalam ZnO dengan *dopant* berupa Al, ada dua jenis donor yang dapat ditentukan: (I) suatu donor yang *native*, yang terdiri dari interstisi Zn atau vakansi O, dan (II) substitusi dari atom Al. Beberapa peneliti, telah mengonfirmasi beberapa hal utama yang menyebabkan penurunan nilai resistivitas tersebut adalah substitusi oleh Al^{3+} pada bagian Zn^{2+} , vakansi oksigen, dan atom interstisi Zn. Reaksi yang terjadi akan menghasilkan adanya elektron bebas yang mana dilepas ke bagian *conduction band*. Hal ini mengakibatkan turunnya resistivitas dari material dengan *doping* (Zhang, et al., 2014). Penambahan sedikit aluminium akan berkontribusi pada pembawa muatan bebas yang mana menyebabkan konduktivitas listrik meningkat.



Beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya menunjukkan jika semakin meningkat nilai *doping* akan meningkatkan nilai konduktivitas listrik pada material semikonduktor akibat dari semakin banyaknya elektron bebas yang terbentuk. Namun, pada hasil pengujian terlihat bahwa sampel 3% dan 4% mengalami penurunan nilai konduktivitas listriknya.

Berdasarkan analisis yang dilakukan Lu, et al., (2006), ketika kandungan *doping* Al mencapai konsentrasi kritisnya, dapat menyebabkan *intragrain congregation* dan/atau *grain-boundary segregation* yang membentuk kluster Al-Al dan Al-O seperti AlO_x *suboxides* yang mana ini terindikasi pada sampel 4% yang didapati adanya fasa lain. Selain itu, diindikasikan bahwa mobilitas dari pembawa muatan akan mengalami penurunan secara bertahap dengan kandungan Al yang meningkat dan mencapai batas kritisnya. Hal ini diindikasikan karena salah satu faktor lain yang mempengaruhi konduktivitas dan resistivitas listrik yaitu berbagai mekanisme *scattering*. Beberapa mekanisme

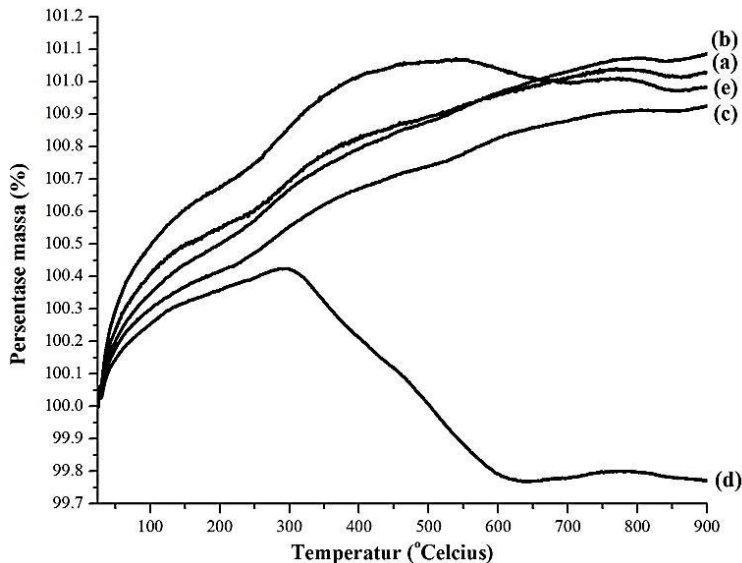
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN



scattering yang dapat mempengaruhi mobilitas pembawa muatan antara lain *ionized impurity scattering*, *neutral impurity scattering*, *grain boundary scattering*, *intragrain cluster scattering*, dan *lattice vibration scattering*. Semakin naik level *doping*, akan semakin banyak atom *dopant* yang mengisi sisi atom Zn pada kisi, yang mana menghasilkan pembawa muatan yang berlebih. Namun, setelah pada level *doping* tertentu, tidak ada lagi bagian sisi Zn yang dapat diisi oleh atom *dopant* karena adanya batas kelarutan Al di dalam ZnO kristalit. Sehingga, hal ini menyebabkan aluminium dapat mengisi bagian interstisi sehingga menimbulkan distorsi pada struktur kristal. Hal ini terindikasi dari hasil *XRD* dan akan mengakibatkan mobilitas pembawa muatan akan semakin menurun karena munculnya efek *scattering* dan *grain boundaries barrier* (Nakrela, et al., 2016). Sehingga beberapa indikasi tersebut memungkinkan terjadinya penurunan konduktivitas listrik dari sampel 3% dan 4%. Hasil optimum dari konduktivitas listrik berada pada nilai *doping* 2 at.%.

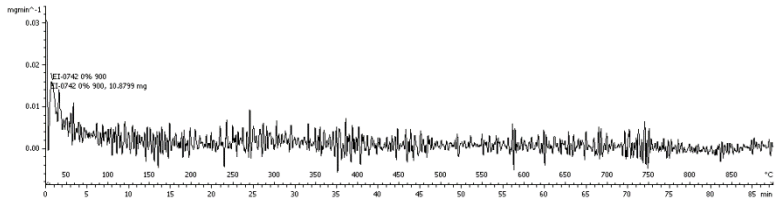
4.6. Analisis Pengaruh *Doping* terhadap Sifat Termal *Al-Doped ZnO*

Pengujian *DSC-TGA* dilakukan untuk mengetahui sifat termal dari serbuk ZnO hasil sintesis akibat dari penambahan *doping* Al. Sifat termal yang dianalisis pada penelitian ini adalah ketahanan termal dari masing-masing sampel karena material *Al-doped ZnO* ini akan diaplikasikan pada temperatur tinggi. Analisis pada penelitian ini dilakukan dari hasil pengujian *TGA*.



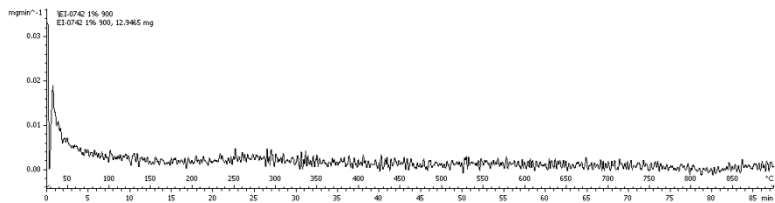
Gambar 4.21. Persentase Massa untuk Masing-Masing Sampel pada Temperatur Kamar hingga 900° C: (a) Tanpa doping; (b) Doping 1%; (c) Doping 2%; (d) Doping 3%; dan (e) Doping 4%.

Gambar 4.21 menunjukkan persentase perubahan dari massa sampel yang diuji. Hasil tersebut menunjukkan perubahan yang tidak terlalu signifikan dari masing-masing sampel. Kemudian, dilakukan analisis dengan menggunakan kurva *DTG* dari masing-masing sampel untuk mengetahui kestabilan sampel pada temperatur tinggi.



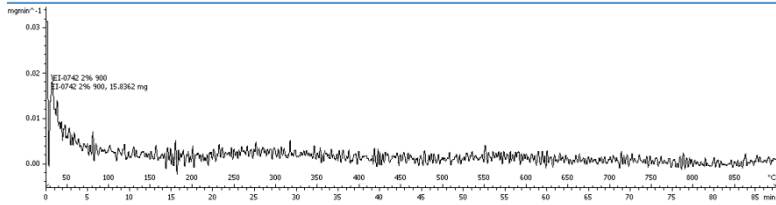
Gambar 4.22. Kurva *DTG* Serbuk ZnO Tanpa *Doping*

Untuk sampel ZnO tanpa *doping*, kurva turunan *TGA* di tunjukkan oleh **Gambar 4.22**. Kurva tersebut menggambarkan kestabilan massa ZnO dari temperatur kamar hingga temperatur 900° C. Hasil pengukuran laju massa pada kurva *DTG* tersebut menunjukkan hasil yang stabil.



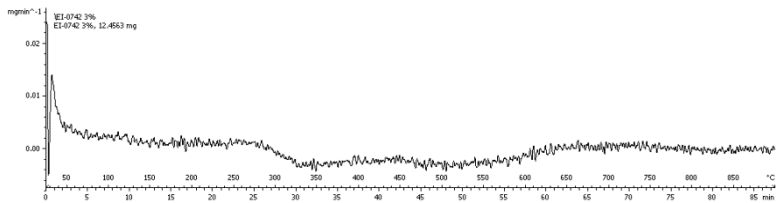
Gambar 4.23. Kurva *DTG* sampel dengan *doping* 1%.

Pada **Gambar 4.23**, kurva *DTG* dari sampel dengan *doping* 1 % menunjukkan nilai yang cukup stabil pada setiap kenaikan temperatur dari temperatur kamar hingga 900° C. Begitu juga pada **Gambar 4.24** yang mana merupakan kurva *DTG* dari sampel dengan *doping* 2%. Pada kedua gambar ini, massa ZnO yang diuji terlihat stabil. Tidak terlihat adanya pengaruh dari *doping* yang diberikan terhadap kestabilan kedua sampel tersebut.



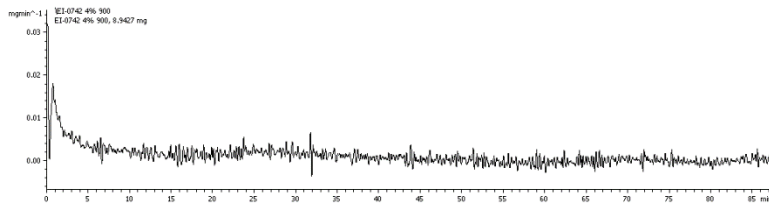
Gambar 4.24. Kurva *DTG* sampel dengan *doping* 2%.

Pada hasil kurva *DTG* dari sampel dengan *doping* 3% yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.25** berikut, terdapat beberapa perubahan yang terjadi pada sampel.



Gambar 4.25. Kurva *DTG* sampel dengan *doping* 3%.

Sampel mengalami kestabilan massa dari temperatur kamar hingga temperatur sekitar 300° C. Pada temperatur sekitar 300° C, terjadi adanya reaksi yang terindikasi sebagai reaksi desorpsi. Reaksi ini dimungkinkan menghasilkan oksigen dalam bentuk gas (Widmann, 2001). Pada temperatur sekitar 600° C, serbuk ZnO dengan *doping* 3% ini terlihat mulai mengalami kestabilan lagi hingga temperatur uji 900° C.



Gambar 4.26. Kurva *DTG* sampel dengan *doping* 4%.



Sampel dengan *doping* 4% mengalami kestabilan massa yang baik pada setiap peningkatan temperatur. Hal ini terlihat dari **Gambar 4.26** yang mana kurva *DTG* memperlihatkan kurva yang stabil. Dari keseluruhan analisis kestabilan termal yang dilakukan, terlihat jika adanya penambahan *doping* ke pada material ZnO tidak terlalu berpengaruh terhadap kestabilan termalnya. Reaksi yang mungkin terjadi selama proses pemanasan pada pengujian adalah desorpsi dan oksidasi. Sehingga, material ini dapat dijadikan sebagai kandidat material termoelektrik pada aplikasi temperatur tinggi.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan dari material ZnO dengan komposisi penambahan aluminium sebesar 0; 1; 2; 3; dan 4 *at. %*, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Penambahan komposisi aluminium dari Al_2O_3 dapat mempengaruhi sifat listrik seperti konduktivitas listrik dari material ZnO. Namun, pada komposisi *doping* tertentu dapat menurunkan konduktivitas listrik ZnO. Komposisi optimal untuk nilai konduktivitas listrik adalah dengan jumlah *doping* sebesar 2 *at. %*.
- 2) Penambahan *doping* tidak terlalu mempengaruhi kestabilan termal material ZnO pada temperatur kamar hingga tinggi. Kestabilan termal dari ZnO cukup baik dengan naiknya temperatur hingga 900° C. Sehingga, material *Al-doped* ZnO ini dapat dijadikan kandidat material termoelektrik untuk aplikasi pada temperatur tinggi.

5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, berikut beberapa saran yang dapat diperhatikan:

- Dilakukan pengujian koefisien *Seebeck* serta berbagai pengujian lainnya untuk material *Al-doped* ZnO terkait dengan aplikasinya sebagai material termoelektrik.
- Dapat dilakukan penelitian dengan variasi lain.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Aluminum Oxide (Alumina) Ceramics & Properties, 2016. **Marketech International Inc.** [Online] Available at: <http://mkt-intl.com/materials/ceramic-materials/aluminum-oxide/> [Accessed 22 December 2016].
- Akdag, A. et al., 2016. **Structural and Morphological Properties of Al doped ZnO Nanoparticles**. Journal of Physics: Conference Series, Volume 707, pp. 1-6.
- Bagnall, D. et al., 1997. **Optically Pumped Lasing of ZnO at Room Temperature**. Appl. Phys. *Lett.*.
- Barsoum, M. W., 2003. **Series in Materials Science and Engineering Fundamentals of Ceramics**. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing Ltd.
- Cai, K., Müller, E., Drašar, C. & Mrotz, A., 2003. **Preparation and Thermoelectric Properties of Al-doped ZnO Ceramics**. Materials Science and Engineering B 104, pp. 45-48.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G., 2009. **Materials Science and Engineering An Introduction**. USA: John Wiley & Sons, Inc..
- Carter, C. B. & Norton, M. G., 2013. **Ceramic Materials Science and Engineering**. New York: Springer Science and Business Media .
- Chen, K. J. et al., 2008. **The Crystallization and Physical Properties of Al-doped ZnO Nanoparticles**. Applied Surface Science, Volume 254, pp. 5791-5795.
- Fan, Z. & Lu, J. G., 2005. **Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties**. Journal of Nanoscience and Nanotechnology , 5(10), pp. 1561-1573.
- Gautam, D. et al., 2015. **Thermoelectric Properties of Pulsed Current Sintered Nanocrystalline Al-doped ZnO by Chemical Vapour Synthesis**. J. Mater: Chem. A, Volume 3, pp. 189-197.



- Gayner, C. & Kar, K. K., 2016. **Recent Advances in Thermoelectric Materials**. Progress in Materials Science.
- Ghazai, A. J., A. E., Salman & H., Z., 2016. **Structural Properties of ZnO Thin Films Prepared Using Different Techniques**. Swift Journal of Physical Sciences, Volume 2, pp. 001-004.
- Goldsmid, H., 2010. **Introduction to Thermoelectricity**. Heidelberg: Springer.
- Hansson, R., Hayes, P. C. & Jak, E., 2005. **Experimental Study of Phase Equilibria in the Al-Fe-Zn-O System in Air**. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, Volume 35B, pp. 633-642.
- Jeong, C., Kim, H., Chang, D. & Kamisako, K., 2008. **Effect on Al₂O₃ Doping Concentration of RF Magnetron Sputtered ZnO:Al Film for Solar Cell Applications**. Japanese Journal of Applied Physics, pp. 5656-5658.
- Kayani, Z. N., Saleemi, F. & Batool, I., 2015. **Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles**. Materials Today Proceedings ICSSP'13, 2(10), pp. 5619-5621.
- Khan, W. et al., 2013. **Synthesis and Characterization of Al Doped ZnO Nanoparticles**. International Journal of Modern Physics: Conference Series, Volume 22, pp. 630-636.
- Kumar, M. & Sahu, S., 2010. **Zinc Oxide Nanostructures Synthesized by Oxidation of Zinc**. Rourkela: Department of Metallurgical and Materials Engineering National Institute of Technology.
- Li, J.-F., Liu, W.-S., Zhao, L.-D. & Zhou, M., 2010. **High-Performance Nanostructured Thermoelectric Materials**. NPG Asia Materials 2, pp. 152-158.
- Liu, M. & Qin, X., 2012. **Enhanced Thermoelectric Performance through Energy-Filtering Effects in Nanocomposites Dispersed with Metallic Particles**. App Phys Lett, pp. 1-4.



-
- Lu, J. et al., 2006. **Structural, Optical, and Electrical Properties of (Zn,Al)O Films Over a Wide Range of Compositions.** Journal of Applied Physics, Volume 100, pp. 073714-1 - 073714-11.
- Mallika, A. N., Reddy, A. R., Babu, K. S. & Reddy, K. V., 2014. **Synthesis and Optical Characterization of Aluminium Doped ZnO Nanoparticles.** Ceramics International, 40(8), pp. 12171-12177.
- Mang, A., Reimann, K. & Rubenacke, S., 1995. **Band Gaps, Crystal-Field Splitting, Spin-Orbit Coupling, and Exciton Binding Energies in ZnO Under Hydrostatic Pressure.** Solid State Communications, pp. 251-254.
- McNaught, A. D. & Wilkinson, A., 1997. **IUPAC. Compendium of Chemical Terminology.** Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Morkoç , H. & Özgür, Ü., 2009. **Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology.** Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Nakrela, A. et al., 2016. **Site Location of Al-Dopant in ZnO Lattice by Exploiting the Structural and Optical Characterisation of ZnO:Al Thin Films.** Results in Physics, Volume 6, pp. 133-138.
- Ohtaki, M. & Araki, K., 2011. **Thermoelectric Properties and Thermopower Enhancement of Al-doped ZnO with Nanosized Pore Structure.** Journal of the Ceramic Society of Japan, 119(11), pp. 813-816.
- Pei, Y. et al., 2012. **Thermopower Enhancement in Pb1-xMnxTe Alloys and Its Effect on Thermoelectric Efficiency.** NPG Asia Mater, pp. 1-6.
- Raoufi, D., 2013. **Synthesis and Microstructural Properties of ZnO Nanoparticles Prepared by Precipitation Method.** Renewable Energy, Volume 50, pp. 932-937.
- Rosyidah, N., Purwaningsih, S. Y. & Darminto, 2012. **Sintesis Nanopartikel ZnO dengan Metode Kopresipitasi.** Teknik POMITS, pp. 1-7.
-



- Sabril, N. S. et al., 2013. **Effect of Aluminium and Indium Doping on Structural and Optical Properties of ZnO Nanoparticles Prepared by Mechanochemical Processing.** International Journal of Institute of Material Malaysia, Volume 2.
- Shirai, T., Watanabe, H., Fuji, M. & Takahashi, M., 2009. **Structural Properties and Surface Characteristics on Aluminium Oxide Powders.** pp. 23-31.
- Shirouzu, K. et al., 2007. **Distribution and Solubility Limit of Al in Al₂O₃-Doped ZnO Sintered Body.** Journal of the Ceramic Society of Japan, 115(4), pp. 254-258.
- Shui, A., 2009. **Preparation and Properties for Aluminium-doped Zinc Oxide Powders with the Coprecipitation Method.** Journal of Ceramic Society of Japan, Volume 117, pp. 703-705.
- Sutjahja, I. M., 2011. **Penelitian Bahan Termoelektrik bagi Aplikasi Konversi Energi di Masa Mendatang.** Jurnal Material dan Energi Indonesia, 01(01), pp. 58-70.
- Tsubota, T., Ohtaki, M., Eguchi, K. & Arai, H., 1997. **Thermoelectric Properties of Al-doped ZnO as A Promising Oxide Material for High Temperature Thermoelectric Conversion.** J. Mater. Chem, 7(1), pp. 85-90.
- Vogel, A., 1937. **Macro and Semimicro Qualitative Inorganic Analysis.** London: Longmas.
- Wang, Z. L., Liu, Y. & Zhang, Z., 2003. **Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials: Synthesis.** Hsinchun: Tsing Hua University Press.
- Widmann, G., 2001. **Interpreting TGA Curves UserCom Mettler Toledo 1/2001.** Switzerland: UserCom Mettler Toledo.
- Xiangjun, L., Yu, Z., Tao, X. & DengPan, N., 2008. **Synthesis and Structure Analysis of Aluminium Doped Zinc Oxide Powders.** Science in China Series B. Chemistry, 51(9), pp. 823-828.
-



-
- Zhang, P., Hong, R. Y., Chen , Q. & Feng, W. G., 2014. **On the Electrical Conductivity and Photocatalytic Activity of Aluminium-Doped Zinc Oxide.** Powder Technology, Volume 253, pp. 360-367.
- Zhang, X. & Zhao, L.-D., 2015. **Thermoelectric Materials: Energy Conversion between Heat and Electricity.** Journal of Materiomics 1, pp. 92-105.
-



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran A : Contoh Perhitungan Massa Doping

Doping 1at.%.

$$\begin{aligned}\text{a. Berat 1 atom Al} &= \frac{n \times \text{Ar}}{N_{\text{avogadro}}} \\ &= \frac{1 \times 26.98}{6.022 \times 10^{23}} \\ &= 4.48 \times 10^{-23}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. Berat 99 atom Zn} &= \frac{n \times \text{Ar}}{N_{\text{avogadro}}} \\ &= \frac{99 \times 65.38}{6.022 \times 10^{23}} \\ &= 1.0748 \times 10^{-20}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{c. Persentase Al} &= \frac{4.48 \times 10^{-23}}{(4.48 \times 10^{-23} + 1.0748 \times 10^{-20})} \times 100\% \\ &= 0.42 \%\end{aligned}$$

$$\text{d. Persentase Zn} = 100\% - 0.42\% = 99.58\%$$

Perhitungan massa Al_2O_3 untuk 5 gram ZnO

$$\begin{aligned}\text{a. Massa Zn} &= \frac{\text{Ar.Zn}}{\text{Mr.ZnO}} \times \text{m. ZnO} \\ &= \frac{65.38}{81.38} \times 5 \text{ gram} \\ &= 4.016957 \text{ gram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{b. Massa Total} &= \frac{100\%}{\%.\text{Zn}} \times \text{Massa Zn} \\ &= \frac{100\%}{99.58\%} \times 4.016957 \\ &= 4.033899377 \text{ gram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. Massa Al} &= \text{Massa Total} - \text{Massa Zn} \\
 &= 4.033899377 \text{ gram} - 4.016957 \text{ gram} \\
 &= 0.0169424 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{d. Massa Al}_2\text{O}_3 &= \frac{\text{Mr. Al}_2\text{O}_3}{n \times \text{Ar. Al}} \times \text{Massa Al} \\
 &= \frac{101.957}{2 \times 26.98} \times 0.0169424 \text{ gram} \\
 &= 0.032 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{e. Massa Total} &= \text{Massa ZnO} + \text{massa Al}_2\text{O}_3 \\
 &= 5 + 0.032 = 5.032 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Tabel 1. Jumlah massa bahan baku untuk masing-masing sampel.

| No. | Sampel | ZnO | Al ₂ O ₃ | Total |
|-----|----------------------|--------|--------------------------------|-------------|
| 1 | Tanpa <i>Doping</i> | 5 gram | - | 5 gram |
| 2 | <i>Doping 1 at.%</i> | 5 gram | 0.032 gram | 5.032 gram |
| 3 | <i>Doping 2 at.%</i> | 5 gram | 0.0639 gram | 5.0639 gram |
| 4 | <i>Doping 3 at.%</i> | 5 gram | 0.0959 gram | 5.0959 gram |
| 5 | <i>Doping 4 at.%</i> | 5 gram | 0.1265 gram | 5.1265 gram |

Lampiran B: Contoh Perhitungan *Crystallite Size*

Contoh perhitungan untuk sampel tanpa *doping*.

$$D = \frac{\kappa\lambda}{\beta\cos\theta}$$

$$D = \frac{\kappa\lambda}{\sqrt{(\beta^2_{\text{sampel}}) - (\beta^2_{\text{instrumen}})} \cos\theta}$$

D = *Crystallite Size*

κ = konstanta (0.9)

λ = 1.54060 Å

β = FWHM setelah koreksi dalam satuan radian

$$\beta = \sqrt{(\beta^2_{\text{sampel}}) - (\beta^2_{\text{instrumen}})}$$

θ = *theta peak* ($0.5 \times 2\theta$), sehingga:

$$D = \frac{0.9 \times 1.54060 \text{ Å}}{\sqrt{8.15864 \times 10^{-06} - 5.47411 \times 10^{-06}} \cos(18.124905)}$$

$$D = \frac{0.9 \times 1.54060 \text{ Å}}{0.001638452 \times 0.950380572}$$

$$D = 89.0433 \text{ nm}$$

Lampiran C: Contoh Perhitungan *Micro-Strain*

Contoh perhitungan untuk sampel tanpa *doping*

$$Micro - strain (\epsilon) = \frac{\beta}{4\tan\theta}$$

$\epsilon = \text{microstrain}$

β = FWHM setelah koreksi dalam satuan radian

$$\beta = \sqrt{(\beta^2 \text{sampel}) - (\beta^2 \text{instrumen})}$$

θ = theta *peak* ($0.5 \times 2\theta$), sehingga:

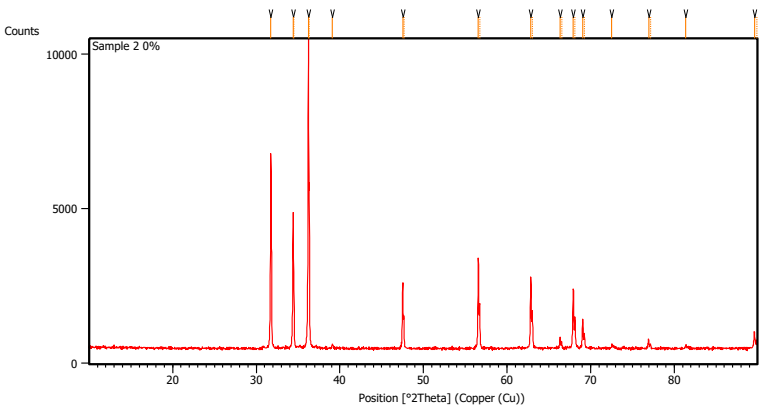
$$Micro - strain (\epsilon) = \frac{\beta}{4\tan\theta}$$

$$Micro - strain (\epsilon) = \frac{0.001638452}{4\tan(18.124905)}$$

$$Micro - strain (\epsilon) = 0.001251$$

Lampiran D: Hasil Pengujian XRD dan ICDD Card

D1. ZnO tanpa Doping (Temperatur *Sintering* 900°C)

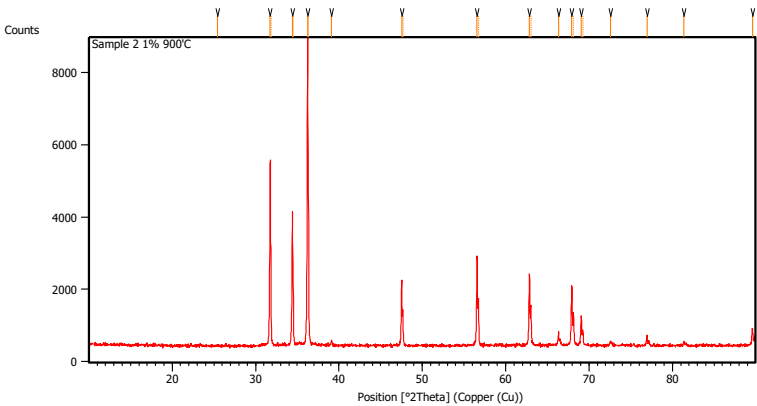


Peak List:

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|
| 31.7476 | 6291.34 | 0.0669 | 2.81858 | 62.91 |
| 34.4151 | 4353.59 | 0.0816 | 2.60383 | 43.54 |
| 34.5183 | 2025.70 | 0.0408 | 2.60272 | 20.26 |
| 36.2343 | 9999.90 | 0.0816 | 2.47716 | 100.00 |
| 36.3430 | 4760.35 | 0.0408 | 2.47614 | 47.60 |
| 39.1142 | 150.14 | 0.1632 | 2.30114 | 1.50 |
| 47.5274 | 2137.65 | 0.1020 | 1.91157 | 21.38 |
| 47.6625 | 1047.06 | 0.0816 | 1.91121 | 10.47 |
| 56.5699 | 2922.03 | 0.1020 | 1.62559 | 29.22 |

| | | | | |
|---------|---------|--------|---------|-------|
| 56.7294 | 1434.33 | 0.0612 | 1.62543 | 14.34 |
| 62.8464 | 2318.69 | 0.1224 | 1.47749 | 23.19 |
| 63.0313 | 1211.83 | 0.0816 | 1.47727 | 12.12 |
| 66.3515 | 352.78 | 0.1224 | 1.40769 | 3.53 |
| 66.5329 | 202.89 | 0.0816 | 1.40778 | 2.03 |
| 67.9263 | 1916.04 | 0.1224 | 1.37883 | 19.16 |
| 68.1198 | 1000.74 | 0.1020 | 1.37881 | 10.01 |
| 69.0581 | 950.24 | 0.1020 | 1.35897 | 9.50 |
| 69.2560 | 442.68 | 0.1020 | 1.35894 | 4.43 |
| 72.5261 | 142.00 | 0.1224 | 1.30230 | 1.42 |
| 76.9539 | 271.44 | 0.1224 | 1.23803 | 2.71 |
| 77.1699 | 162.33 | 0.1224 | 1.23817 | 1.62 |
| 81.4035 | 131.01 | 0.1224 | 1.18122 | 1.31 |
| 89.5906 | 546.54 | 0.1224 | 1.09328 | 5.47 |
| 89.8650 | 268.15 | 0.0612 | 1.09336 | 2.68 |

D2. 1 at.% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

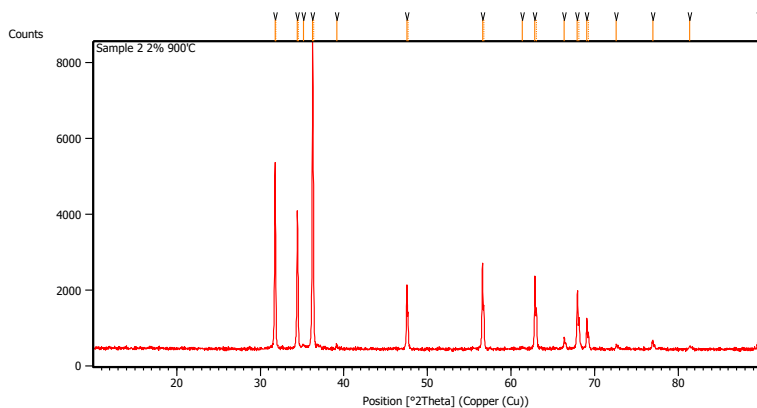


Peak List

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------|------------------|
| 25.4503 | 19.49 | 0.4015 | 3.49989 | 0.23 |
| 31.7524 | 5070.60 | 0.0816 | 2.81583 | 59.39 |
| 31.8499 | 2371.75 | 0.0408 | 2.81442 | 27.78 |
| 34.4178 | 3695.35 | 0.0816 | 2.60362 | 43.28 |
| 34.5216 | 1756.24 | 0.0408 | 2.60248 | 20.57 |
| 36.2382 | 8538.07 | 0.1020 | 2.47690 | 100.00 |
| 36.3491 | 3935.70 | 0.0612 | 2.47573 | 46.10 |
| 39.1113 | 152.68 | 0.1224 | 2.30131 | 1.79 |
| 47.5330 | 1831.34 | 0.0816 | 1.91136 | 21.45 |

| | | | | |
|---------|---------|--------|---------|-------|
| 47.6627 | 1000.36 | 0.0612 | 1.91120 | 11.72 |
| 56.5762 | 2485.02 | 0.1020 | 1.62543 | 29.11 |
| 56.7369 | 1259.43 | 0.0816 | 1.62523 | 14.75 |
| 62.8532 | 1979.27 | 0.1224 | 1.47735 | 23.18 |
| 63.0251 | 1059.93 | 0.0816 | 1.47740 | 12.41 |
| 66.3435 | 381.27 | 0.0816 | 1.40784 | 4.47 |
| 67.9307 | 1655.87 | 0.1224 | 1.37876 | 19.39 |
| 68.1299 | 884.34 | 0.1020 | 1.37863 | 10.36 |
| 69.0653 | 809.32 | 0.1020 | 1.35885 | 9.48 |
| 69.2893 | 402.46 | 0.1224 | 1.35837 | 4.71 |
| 72.5942 | 140.06 | 0.1428 | 1.30124 | 1.64 |
| 76.9510 | 288.05 | 0.0816 | 1.23806 | 3.37 |
| 81.3684 | 124.49 | 0.1224 | 1.18164 | 1.46 |
| 89.6057 | 465.37 | 0.1428 | 1.09313 | 5.45 |

D3. 2 at.% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

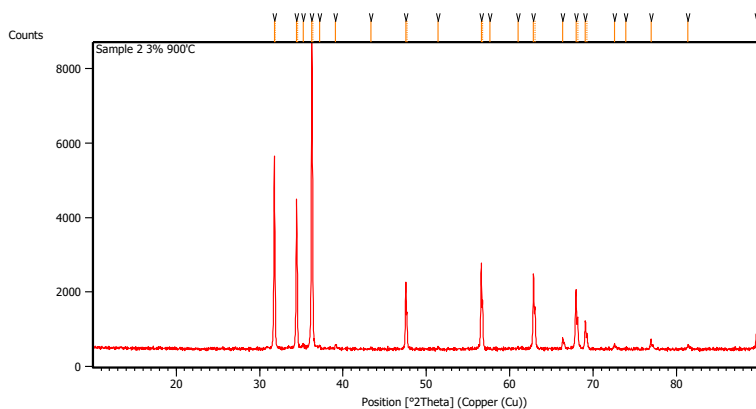


Peak List:

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|
| 31.7725 | 4930.03 | 0.1224 | 2.81410 | 60.57 |
| 31.8684 | 2439.79 | 0.0408 | 2.81282 | 29.97 |
| 34.4376 | 3643.66 | 0.0816 | 2.60218 | 44.76 |
| 34.5406 | 1846.78 | 0.0408 | 2.60110 | 22.69 |
| 35.1612 | 100.53 | 0.3264 | 2.55026 | 1.24 |
| 36.2570 | 8139.87 | 0.1020 | 2.47566 | 100.00 |
| 36.3674 | 3916.03 | 0.0612 | 2.47453 | 48.11 |
| 39.1490 | 122.13 | 0.1632 | 2.29918 | 1.50 |
| 47.5493 | 1712.36 | 0.1020 | 1.91075 | 21.04 |
| 47.6844 | 901.13 | 0.0612 | 1.91038 | 11.07 |

| | | | | |
|---------|---------|--------|---------|-------|
| 56.5874 | 2253.11 | 0.1020 | 1.62513 | 27.68 |
| 56.7602 | 1147.87 | 0.0816 | 1.62462 | 14.10 |
| 61.3522 | 33.41 | 0.4896 | 1.50985 | 0.41 |
| 62.8695 | 1939.47 | 0.1020 | 1.47701 | 23.83 |
| 63.0557 | 982.27 | 0.1020 | 1.47675 | 12.07 |
| 66.3717 | 304.62 | 0.0816 | 1.40731 | 3.74 |
| 67.9321 | 1466.96 | 0.1224 | 1.37873 | 18.02 |
| 68.1356 | 800.59 | 0.1020 | 1.37853 | 9.84 |
| 69.0808 | 804.02 | 0.1020 | 1.35858 | 9.88 |
| 69.2603 | 432.43 | 0.0816 | 1.35887 | 5.31 |
| 72.6058 | 112.59 | 0.1224 | 1.30106 | 1.38 |
| 76.9977 | 206.96 | 0.1632 | 1.23743 | 2.54 |
| 81.3587 | 70.68 | 0.3264 | 1.18176 | 0.87 |
| 89.6180 | 483.73 | 0.0816 | 1.09302 | 5.94 |

D4. 3 at.% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

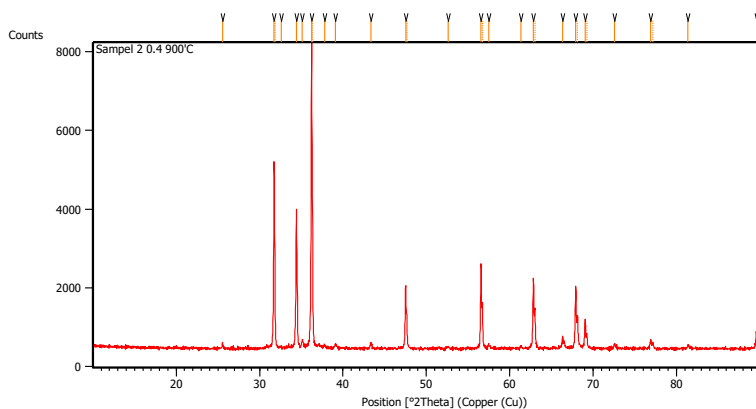


Peak List

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|---------------------|
| 31.7738 | 5283.44 | 0.1020 | 2.81399 | 63.90 |
| 31.8726 | 2405.96 | 0.0408 | 2.81246 | 29.10 |
| 34.4335 | 3972.84 | 0.1020 | 2.60247 | 48.05 |
| 34.5359 | 2085.93 | 0.0408 | 2.60144 | 25.23 |
| 35.2439 | 128.53 | 0.2040 | 2.54447 | 1.55 |
| 36.2571 | 8268.19 | 0.1020 | 2.47565 | 100.00 |
| 36.3669 | 4194.19 | 0.0612 | 2.47456 | 50.73 |
| 37.1900 | 88.52 | 0.2448 | 2.41567 | 1.07 |
| 39.1038 | 119.10 | 0.1632 | 2.30173 | 1.44 |

| | | | | |
|---------|---------|--------|---------|-------|
| 43.3829 | 33.62 | 0.4896 | 2.08410 | 0.41 |
| 47.5434 | 1787.87 | 0.1020 | 1.91097 | 21.62 |
| 47.6896 | 881.49 | 0.0612 | 1.91019 | 10.66 |
| 51.4097 | 30.71 | 0.4896 | 1.77597 | 0.37 |
| 56.5982 | 2289.77 | 0.1224 | 1.62485 | 27.69 |
| 56.7616 | 1259.23 | 0.0816 | 1.62458 | 15.23 |
| 57.6401 | 22.28 | 0.4896 | 1.59793 | 0.27 |
| 60.9979 | 46.54 | 0.2448 | 1.51776 | 0.56 |
| 62.8614 | 2013.99 | 0.1224 | 1.47718 | 24.36 |
| 63.0502 | 1054.06 | 0.1020 | 1.47687 | 12.75 |
| 66.3548 | 307.16 | 0.0816 | 1.40763 | 3.71 |
| 67.9480 | 1603.32 | 0.1224 | 1.37845 | 19.39 |
| 68.1629 | 790.58 | 0.1020 | 1.37804 | 9.56 |
| 69.0841 | 720.82 | 0.1224 | 1.35853 | 8.72 |
| 69.2611 | 414.43 | 0.1224 | 1.35885 | 5.01 |
| 72.5704 | 133.18 | 0.1224 | 1.30161 | 1.61 |
| 73.9044 | 24.94 | 0.4896 | 1.28138 | 0.30 |
| 76.9663 | 231.02 | 0.0816 | 1.23786 | 2.79 |
| 81.3771 | 96.57 | 0.3264 | 1.18154 | 1.17 |
| 89.6147 | 428.48 | 0.1632 | 1.09305 | 5.18 |

D5. 4 at.% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)



Peak List

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|------------------|
| 25.5477 | 154.78 | 0.0669 | 3.48677 | 1.99 |
| 31.7457 | 4728.57 | 0.1224 | 2.81641 | 60.88 |
| 31.8383 | 2388.74 | 0.0408 | 2.81541 | 30.76 |
| 32.6083 | 31.31 | 0.2856 | 2.74386 | 0.40 |
| 34.4193 | 3527.73 | 0.1020 | 2.60352 | 45.42 |
| 35.1179 | 197.44 | 0.2040 | 2.55330 | 2.54 |
| 36.2332 | 7766.61 | 0.1020 | 2.47723 | 100.00 |
| 36.3417 | 3861.78 | 0.0408 | 2.47622 | 49.72 |
| 37.7916 | 104.15 | 0.1632 | 2.37858 | 1.34 |
| 39.1158 | 113.66 | 0.1224 | 2.30105 | 1.46 |

| | | | | |
|---------|---------|--------|---------|-------|
| 43.3374 | 144.89 | 0.1632 | 2.08618 | 1.87 |
| 47.5241 | 1594.72 | 0.1020 | 1.91170 | 20.53 |
| 47.6662 | 843.57 | 0.0612 | 1.91107 | 10.86 |
| 52.6206 | 40.07 | 0.3264 | 1.73791 | 0.52 |
| 56.5672 | 2145.64 | 0.1020 | 1.62566 | 27.63 |
| 56.7343 | 1140.49 | 0.0612 | 1.62530 | 14.68 |
| 57.4650 | 119.35 | 0.1632 | 1.60238 | 1.54 |
| 61.3563 | 40.77 | 0.2448 | 1.50975 | 0.52 |
| 62.8453 | 1781.94 | 0.1224 | 1.47752 | 22.94 |
| 63.0260 | 967.28 | 0.1020 | 1.47738 | 12.45 |
| 66.3330 | 323.29 | 0.1020 | 1.40803 | 4.16 |
| 67.9269 | 1577.92 | 0.1020 | 1.37882 | 20.32 |
| 68.1285 | 832.94 | 0.1224 | 1.37865 | 10.72 |
| 69.0626 | 742.20 | 0.1020 | 1.35890 | 9.56 |
| 69.2569 | 359.22 | 0.1020 | 1.35893 | 4.63 |
| 72.5686 | 102.28 | 0.1632 | 1.30164 | 1.32 |
| 76.9359 | 216.81 | 0.1020 | 1.23827 | 2.79 |
| 77.2000 | 134.63 | 0.1224 | 1.23776 | 1.73 |
| 81.3905 | 112.96 | 0.1224 | 1.18138 | 1.45 |
| 89.5954 | 405.01 | 0.1224 | 1.09323 | 5.21 |

D6. ICDD Card ZnO Wurtzite (PDF-01-078-3322)

Date: 11/17/2016 Time: 2:40:21 PM User: Teknik Material

Name and formula

| | |
|--------------------|-------------|
| Reference code: | 01-078-3322 |
| Compound name: | Zinc Oxide |
| Empirical formula: | OZn |
| Chemical formula: | ZnO |

Crystallographic parameters

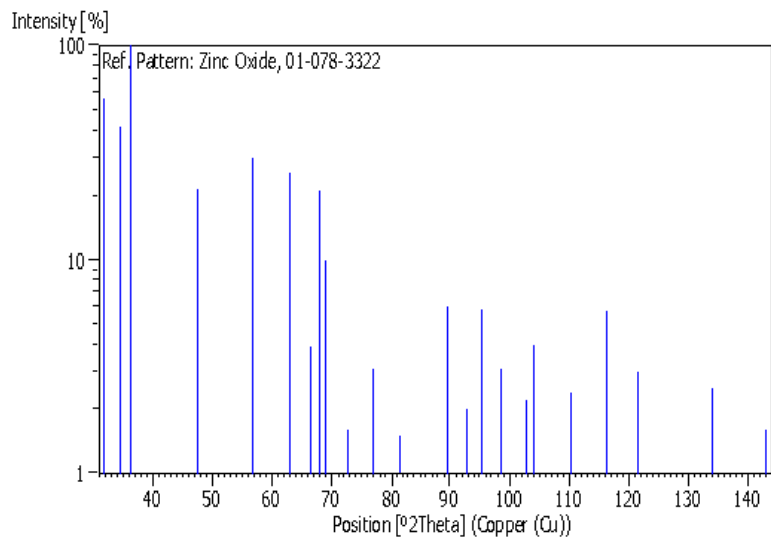
| | |
|--|-----------|
| Crystal system: | Hexagonal |
| Space group: | P63mc |
| Space group number: | 186 |
| a (Å): | 3.2504 |
| b (Å): | 3.2504 |
| c (Å): | 5.2057 |
| Alpha (°): | 90.0000 |
| Beta (°): | 90.0000 |
| Gamma (°): | 120.0000 |
| Volume of cell (10 ⁶ pm ³): | 47.63 |
| Z: | 2.00 |
| RIR: | 5.18 |

Peak list

| No. | h | k | l | d [Å] | 2Theta[deg] | I [%] |
|-----|---|---|---|---------|-------------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 2.81490 | 31.763 | 56.3 |
| 2 | 0 | 0 | 2 | 2.60280 | 34.429 | 42.1 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 2.47610 | 36.250 | 100.0 |
| 4 | 1 | 0 | 2 | 1.91110 | 47.540 | 21.6 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 1.62520 | 56.585 | 29.8 |
| 6 | 1 | 0 | 3 | 1.47710 | 62.865 | 25.6 |
| 7 | 2 | 0 | 0 | 1.40750 | 66.362 | 3.9 |
| 8 | 1 | 1 | 2 | 1.37850 | 67.945 | 21.1 |
| 9 | 2 | 0 | 1 | 1.35870 | 69.074 | 10.0 |
| 10 | 0 | 0 | 4 | 1.30140 | 72.584 | 1.6 |
| 11 | 2 | 0 | 2 | 1.23800 | 76.956 | 3.1 |
| 12 | 1 | 0 | 4 | 1.18130 | 81.397 | 1.5 |
| 13 | 2 | 0 | 3 | 1.09310 | 89.610 | 6.0 |
| 14 | 2 | 1 | 0 | 1.06390 | 92.777 | 2.0 |
| 15 | 2 | 1 | 1 | 1.04240 | 95.287 | 5.8 |
| 16 | 1 | 1 | 4 | 1.01590 | 98.619 | 3.1 |
| 17 | 2 | 1 | 2 | 0.98480 | 102.923 | 2.2 |
| 18 | 1 | 0 | 5 | 0.97650 | 104.154 | 4.0 |
| 19 | 2 | 0 | 4 | 0.95550 | 107.448 | 0.6 |
| 20 | 3 | 0 | 0 | 0.93830 | 110.361 | 2.4 |
| 21 | 2 | 1 | 3 | 0.90700 | 116.268 | 5.7 |
| 22 | 3 | 0 | 2 | 0.88270 | 121.539 | 3.0 |
| 23 | 0 | 0 | 6 | 0.86760 | 125.209 | 0.4 |
| 24 | 2 | 0 | 5 | 0.83700 | 133.943 | 2.5 |

| | | | | | | |
|----|---|---|---|---------|---------|-----|
| 25 | 1 | 0 | 6 | 0.82910 | 136.584 | 0.5 |
| 26 | 2 | 1 | 4 | 0.82370 | 138.511 | 0.8 |
| 27 | 2 | 2 | 0 | 0.81260 | 142.863 | 1.6 |

Stick Pattern



D7. ICDD Card Al_2O_3 (PDF-01-076-7774)

Date: 11/30/2016 Time: 3:58:11 PM User: Teknik Material

Name and formula

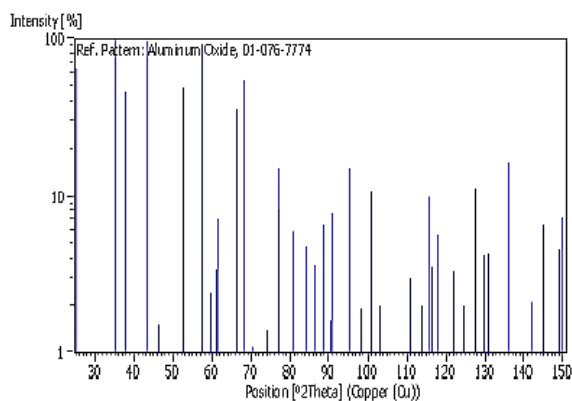
| | |
|--------------------|--------------------------------|
| Reference code: | 01-076-7774 |
| Mineral name: | Corundum, syn |
| Compound name: | Aluminum Oxide |
| Common name: | $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ |
| Empirical formula: | Al_2O_3 |
| Chemical formula: | Al_2O_3 |

Crystallographic parameters

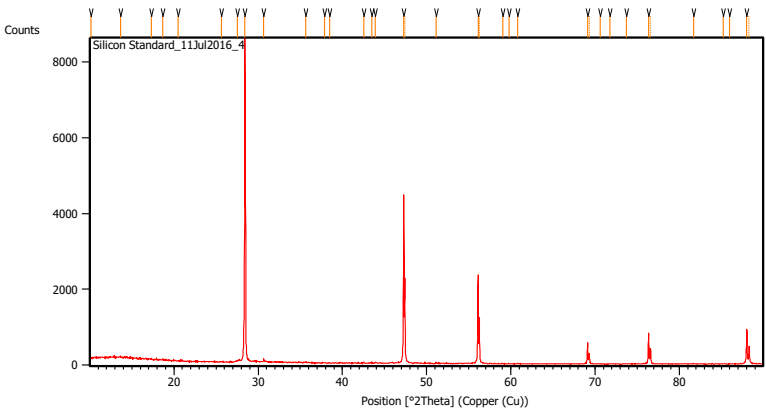
| | |
|---|--------------|
| Crystal system: | Rhombohedral |
| Space group: | R-3c |
| Space group number: | 167 |
| a (Å): | 4.7617 |
| b (Å): | 4.7617 |
| c (Å): | 12.9990 |
| Alpha (°): | 90.0000 |
| Beta (°): | 90.0000 |
| Gamma (°): | 120.0000 |
| Volume of cell (10^6 pm^3): | 255.25 |
| Z: | 6.00 |
| RIR: | 1.01 |

Peak list

| No. | h | k | l | d [Å] | 2Theta[deg] | I [%] |
|-----|---|---|----|---------|-------------|-------|
| 1 | 0 | 1 | 2 | 3.48200 | 25.562 | 64.7 |
| 2 | 1 | 0 | 4 | 2.55240 | 35.131 | 100.0 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 2.38080 | 37.755 | 46.3 |
| 4 | 0 | 0 | 6 | 2.16650 | 41.654 | 0.5 |
| 5 | 1 | 1 | 3 | 2.08660 | 43.328 | 98.0 |
| 6 | 2 | 0 | 2 | 1.96540 | 46.149 | 1.5 |
| 7 | 0 | 2 | 4 | 1.74100 | 52.520 | 48.7 |
| 8 | 1 | 1 | 6 | 1.60240 | 57.464 | 93.5 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1.54760 | 59.701 | 2.4 |
| 10 | 1 | 2 | 2 | 1.51570 | 61.090 | 3.4 |
| 11 | 0 | 1 | 8 | 1.51180 | 61.264 | 7.1 |
| 12 | 2 | 1 | 4 | 1.40540 | 66.474 | 35.9 |
| 13 | 3 | 0 | 0 | 1.37460 | 68.164 | 54.6 |
| 14 | 1 | 2 | 5 | 1.33680 | 70.371 | 1.1 |
| 15 | 2 | 0 | 8 | 1.27620 | 74.255 | 1.4 |
| 16 | 1 | 0 | 10 | 1.23980 | 76.824 | 15.2 |
| 17 | 1 | 1 | 9 | 1.23490 | 77.185 | 8.2 |
| 18 | 2 | 1 | 7 | 1.19380 | 80.369 | 0.8 |
| 19 | 2 | 2 | 0 | 1.19040 | 80.646 | 5.9 |
| 20 | 0 | 3 | 6 | 1.16070 | 83.158 | 0.7 |
| 21 | 2 | 2 | 3 | 1.14790 | 84.297 | 4.7 |
| 22 | 1 | 3 | 1 | 1.13930 | 85.082 | 0.3 |
| 23 | 3 | 1 | 2 | 1.12640 | 86.292 | 3.6 |
| 24 | 1 | 2 | 8 | 1.12480 | 86.445 | 2.7 |
| 25 | 0 | 2 | 10 | 1.09960 | 88.939 | 6.5 |
| 26 | 0 | 0 | 12 | 1.08320 | 90.654 | 1.6 |
| 27 | 1 | 3 | 4 | 1.07090 | 91.117 | 7.7 |
| 28 | 3 | 1 | 5 | 1.04690 | 94.748 | 0.3 |
| 29 | 2 | 2 | 6 | 1.04330 | 95.179 | 15.1 |
| 30 | 0 | 4 | 2 | 1.01820 | 98.319 | 1.9 |
| 31 | 2 | 1 | 10 | 0.99830 | 100.998 | 10.9 |
| 32 | 1 | 1 | 12 | 0.98600 | 102.748 | 0.3 |
| 33 | 4 | 0 | 4 | 0.98270 | 103.231 | 2.0 |
| 34 | 1 | 3 | 7 | 0.97380 | 104.563 | 0.1 |
| 35 | 3 | 2 | 1 | 0.94360 | 109.440 | 0.4 |
| 36 | 1 | 2 | 11 | 0.94170 | 109.768 | 0.2 |
| 37 | 3 | 1 | 8 | 0.93530 | 110.891 | 3.0 |
| 38 | 2 | 2 | 9 | 0.91860 | 113.976 | 2.0 |
| 39 | 3 | 2 | 4 | 0.90830 | 116.004 | 10.0 |
| 40 | 0 | 1 | 14 | 0.90580 | 116.512 | 3.5 |
| 41 | 4 | 1 | 0 | 0.89990 | 117.737 | 5.6 |
| 42 | 2 | 3 | 5 | 0.88900 | 120.104 | 0.3 |
| 43 | 1 | 4 | 3 | 0.88110 | 121.912 | 3.3 |
| 44 | 0 | 4 | 8 | 0.87050 | 124.477 | 2.0 |
| 45 | 1 | 3 | 10 | 0.85870 | 127.547 | 11.1 |
| 46 | 0 | 3 | 12 | 0.85080 | 129.750 | 4.2 |
| 47 | 2 | 0 | 14 | 0.84660 | 130.976 | 4.3 |
| 48 | 3 | 2 | 7 | 0.84300 | 132.061 | 0.3 |
| 49 | 2 | 1 | 13 | 0.84160 | 132.491 | 0.2 |
| 50 | 1 | 4 | 6 | 0.83100 | 135.930 | 16.5 |
| 51 | 3 | 1 | 11 | 0.82180 | 139.217 | 0.1 |
| 52 | 2 | 3 | 8 | 0.81760 | 140.831 | 0.5 |
| 53 | 1 | 1 | 15 | 0.81430 | 142.158 | 2.1 |
| 54 | 4 | 0 | 10 | 0.80770 | 144.992 | 6.5 |
| 55 | 2 | 2 | 12 | 0.80120 | 148.071 | 0.2 |
| 56 | 0 | 5 | 4 | 0.79940 | 148.986 | 4.5 |
| 57 | 1 | 2 | 14 | 0.79770 | 149.879 | 7.3 |



D8. ICDD Card Reference



Peak List:

| Pos. [°2Th.] | Height [cts] | FWHM Left [°2Th.] | d-spacing [Å] | Rel. Int. [%] |
|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------|---------------------|
| 10.1424 | 3.15 | 0.1338 | 8.72162 | 0.04 |
| 13.6391 | 46.83 | 0.1004 | 6.49248 | 0.58 |
| 17.2993 | 26.12 | 0.1004 | 5.12619 | 0.32 |
| 18.6413 | 11.30 | 0.4015 | 4.76007 | 0.14 |
| 20.4805 | 15.16 | 0.0836 | 4.33655 | 0.19 |
| 25.6440 | 28.17 | 0.0502 | 3.47389 | 0.35 |
| 27.5525 | 36.32 | 0.2676 | 3.23745 | 0.45 |
| 28.4264 | 8090.9 | 0.0502 | 3.13988 | 100.0 |
| | 1 | | | 0 |

| | | | | |
|---------|-------------|--------|---------|-------|
| 30.6501 | 80.67 | 0.0408 | 2.91454 | 1.00 |
| 35.6342 | 9.70 | 0.4015 | 2.51957 | 0.12 |
| 37.8935 | 9.87 | 0.4015 | 2.37438 | 0.12 |
| 38.4656 | 6.02 | 0.2007 | 2.34038 | 0.07 |
| 42.5254 | 26.24 | 0.1171 | 2.12587 | 0.32 |
| 43.4951 | 15.18 | 0.1004 | 2.08070 | 0.19 |
| 43.8760 | 19.57 | 0.0669 | 2.06352 | 0.24 |
| 47.2886 | 4428.0 4 | 0.0816 | 1.92067 | 54.73 |
| 47.4178 | 2300.3 2 | 0.0612 | 1.92050 | 28.43 |
| 51.1232 | 19.85 | 0.0816 | 1.78524 | 0.25 |
| 56.1115 | 2332.6 6 | 0.0816 | 1.63778 | 28.83 |
| 56.2676 | 1185.0 2 | 0.0816 | 1.63767 | 14.65 |
| 59.0335 | 4.80 | 0.3264 | 1.56349 | 0.06 |
| 59.7886 | 6.00 | 0.4080 | 1.54554 | 0.07 |
| 60.8240 | 11.13 | 0.1020 | 1.52169 | 0.14 |
| 69.1195 | 554.01 | 0.0816 | 1.35792 | 6.85 |
| 69.3184 | 266.73 | 0.0816 | 1.35787 | 3.30 |
| 70.6423 | 11.50 | 0.1020 | 1.33233 | 0.14 |
| 71.7466 | 3.79 | 0.2040 | 1.31451 | 0.05 |

| | | | | |
|---------|--------|--------|---------|-------|
| 73.7286 | 6.68 | 0.6528 | 1.28400 | 0.08 |
| 76.3659 | 827.00 | 0.0816 | 1.24609 | 10.22 |
| 76.5935 | 413.98 | 0.1020 | 1.24604 | 5.12 |
| 81.7257 | 4.04 | 0.3264 | 1.17738 | 0.05 |
| 85.2154 | 8.24 | 0.0816 | 1.13785 | 0.10 |
| 85.9673 | 8.36 | 0.2448 | 1.12982 | 0.10 |
| 88.0228 | 918.98 | 0.1020 | 1.10866 | 11.36 |
| 88.2966 | 472.56 | 0.1020 | 1.10868 | 5.84 |

Lampiran E: Hasil Uji Hambatan Listrik

E1. ZnO tanpa Doping (Temperatur *Sintering* 900°C)

| Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) | Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 | 1.80E+08 | 71000 | 3.75E+07 |
| 2000 | 1.80E+08 | 72000 | 3.67E+07 |
| 3000 | 1.80E+08 | 73000 | 3.69E+07 |
| 4000 | 1.80E+08 | 74000 | 3.66E+07 |
| 5000 | 1.80E+08 | 75000 | 3.50E+07 |
| 6000 | 1.98E+08 | 76000 | 3.57E+07 |
| 7000 | 1.88E+08 | 77000 | 3.53E+07 |
| 8000 | 1.65E+08 | 78000 | 3.56E+07 |
| 9000 | 1.57E+08 | 79000 | 3.46E+07 |
| 10000 | 1.46E+08 | 80000 | 3.47E+07 |
| 11000 | 1.16E+08 | 81000 | 3.42E+07 |
| 12000 | 1.02E+08 | 82000 | 3.48E+07 |
| 13000 | 1.01E+08 | 83000 | 3.30E+07 |
| 14000 | 1.04E+08 | 84000 | 3.29E+07 |
| 15000 | 9.36E+07 | 85000 | 3.22E+07 |
| 16000 | 9.46E+07 | 86000 | 3.21E+07 |
| 17000 | 8.83E+07 | 87000 | 3.05E+07 |
| 18000 | 8.76E+07 | 88000 | 3.02E+07 |
| 19000 | 8.68E+07 | 89000 | 2.96E+07 |
| 20000 | 8.44E+07 | 90000 | 2.90E+07 |
| 21000 | 7.66E+07 | 91000 | 3.09E+07 |
| 22000 | 7.31E+07 | 92000 | 3.20E+07 |
| 23000 | 7.14E+07 | 93000 | 3.19E+07 |
| 24000 | 6.88E+07 | 94000 | 3.07E+07 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 25000 | 6.40E+07 | 95000 | 3.04E+07 |
| 26000 | 6.60E+07 | 96000 | 3.09E+07 |
| 27000 | 6.78E+07 | 97000 | 2.99E+07 |
| 28000 | 6.63E+07 | 98000 | 3.01E+07 |
| 29000 | 6.50E+07 | 99000 | 2.92E+07 |
| 30000 | 6.75E+07 | 100000 | 2.92E+07 |
| 31000 | 6.09E+07 | 110000 | 2.67E+07 |
| 32000 | 5.99E+07 | 120000 | 2.45E+07 |
| 33000 | 6.35E+07 | 130000 | 2.51E+07 |
| 34000 | 6.19E+07 | 140000 | 2.22E+07 |
| 35000 | 6.04E+07 | 150000 | 2.07E+07 |
| 36000 | 5.92E+07 | 160000 | 1.99E+07 |
| 37000 | 5.69E+07 | 170000 | 1.87E+07 |
| 38000 | 5.61E+07 | 180000 | 1.74E+07 |
| 39000 | 5.44E+07 | 190000 | 1.63E+07 |
| 40000 | 5.63E+07 | 200000 | 1.62E+07 |
| 41000 | 5.25E+07 | 210000 | 1.57E+07 |
| 42000 | 5.06E+07 | 220000 | 1.53E+07 |
| 43000 | 4.33E+07 | 230000 | 1.30E+07 |
| 44000 | 4.28E+07 | 240000 | 1.27E+07 |
| 45000 | 4.54E+07 | 250000 | 1.16E+07 |
| 46000 | 5.26E+07 | 260000 | 1.12E+07 |
| 47000 | 5.35E+07 | 270000 | 1.06E+07 |
| 48000 | 5.20E+07 | 280000 | 9.74E+06 |
| 49000 | 4.35E+07 | 290000 | 9.66E+06 |
| 50000 | 4.22E+07 | 300000 | 9.11E+06 |
| 51000 | 4.17E+07 | 310000 | 8.57E+06 |
| 52000 | 3.90E+07 | 320000 | 8.57E+06 |
| 53000 | 3.97E+07 | 330000 | 8.22E+06 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 54000 | 3.90E+07 | 340000 | 8.17E+06 |
| 55000 | 3.92E+07 | 350000 | 7.75E+06 |
| 56000 | 3.74E+07 | 360000 | 7.70E+06 |
| 57000 | 4.20E+07 | 370000 | 7.65E+06 |
| 58000 | 4.23E+07 | 380000 | 7.46E+06 |
| 59000 | 3.96E+07 | 390000 | 7.22E+06 |
| 60000 | 4.03E+07 | 400000 | 7.07E+06 |
| 61000 | 4.05E+07 | 410000 | 6.91E+06 |
| 62000 | 4.09E+07 | 420000 | 6.70E+06 |
| 63000 | 3.91E+07 | 430000 | 6.54E+06 |
| 64000 | 4.15E+07 | 440000 | 6.37E+06 |
| 65000 | 3.95E+07 | 450000 | 6.32E+06 |
| 66000 | 3.98E+07 | 460000 | 6.27E+06 |
| 67000 | 3.95E+07 | 470000 | 6.10E+06 |
| 68000 | 3.87E+07 | 480000 | 5.97E+06 |
| 69000 | 3.67E+07 | 490000 | 5.71E+06 |
| 70000 | 3.84E+07 | 500000 | 5.49E+06 |

E2. 1 at.% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

| Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) | Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 | 1.80E+08 | 71000 | 1.50E+07 |
| 2000 | 1.71E+08 | 72000 | 1.48E+07 |
| 3000 | 1.26E+08 | 73000 | 1.46E+07 |
| 4000 | 1.04E+08 | 74000 | 1.44E+07 |
| 5000 | 9.09E+07 | 75000 | 1.43E+07 |
| 6000 | 8.19E+07 | 76000 | 1.41E+07 |
| 7000 | 7.37E+07 | 77000 | 1.40E+07 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 8000 | 6.70E+07 | 78000 | 1.39E+07 |
| 9000 | 6.18E+07 | 79000 | 1.36E+07 |
| 10000 | 5.71E+07 | 80000 | 1.37E+07 |
| 11000 | 5.43E+07 | 81000 | 1.36E+07 |
| 12000 | 5.15E+07 | 82000 | 1.36E+07 |
| 13000 | 4.87E+07 | 83000 | 1.34E+07 |
| 14000 | 4.48E+07 | 84000 | 1.31E+07 |
| 15000 | 4.26E+07 | 85000 | 1.30E+07 |
| 16000 | 4.17E+07 | 86000 | 1.29E+07 |
| 17000 | 4.00E+07 | 87000 | 1.31E+07 |
| 18000 | 3.92E+07 | 88000 | 1.28E+07 |
| 19000 | 3.80E+07 | 89000 | 1.28E+07 |
| 20000 | 3.68E+07 | 90000 | 1.26E+07 |
| 21000 | 3.58E+07 | 91000 | 1.25E+07 |
| 22000 | 3.47E+07 | 92000 | 1.25E+07 |
| 23000 | 3.39E+07 | 93000 | 1.24E+07 |
| 24000 | 3.32E+07 | 94000 | 1.22E+07 |
| 25000 | 3.25E+07 | 95000 | 1.20E+07 |
| 26000 | 3.15E+07 | 96000 | 1.19E+07 |
| 27000 | 3.08E+07 | 97000 | 1.15E+07 |
| 28000 | 2.82E+07 | 98000 | 1.14E+07 |
| 29000 | 2.78E+07 | 99000 | 1.13E+07 |
| 30000 | 2.71E+07 | 100000 | 1.12E+07 |
| 31000 | 2.67E+07 | 110000 | 1.04E+07 |
| 32000 | 2.65E+07 | 120000 | 9.68E+06 |
| 33000 | 2.61E+07 | 130000 | 9.07E+06 |
| 34000 | 2.56E+07 | 140000 | 8.53E+06 |
| 35000 | 2.49E+07 | 150000 | 8.19E+06 |
| 36000 | 2.46E+07 | 160000 | 7.71E+06 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 37000 | 2.41E+07 | 170000 | 7.38E+06 |
| 38000 | 2.36E+07 | 180000 | 7.09E+06 |
| 39000 | 2.34E+07 | 190000 | 6.94E+06 |
| 40000 | 2.28E+07 | 200000 | 6.52E+06 |
| 41000 | 2.24E+07 | 210000 | 6.26E+06 |
| 42000 | 2.21E+07 | 220000 | 6.03E+06 |
| 43000 | 2.18E+07 | 230000 | 5.63E+06 |
| 44000 | 2.15E+07 | 240000 | 5.53E+06 |
| 45000 | 2.13E+07 | 250000 | 5.21E+06 |
| 46000 | 2.09E+07 | 260000 | 5.03E+06 |
| 47000 | 2.07E+07 | 270000 | 4.87E+06 |
| 48000 | 2.05E+07 | 280000 | 4.70E+06 |
| 49000 | 2.00E+07 | 290000 | 4.61E+06 |
| 50000 | 2.00E+07 | 300000 | 4.48E+06 |
| 51000 | 1.97E+07 | 310000 | 4.34E+06 |
| 52000 | 1.94E+07 | 320000 | 4.27E+06 |
| 53000 | 1.91E+07 | 330000 | 4.17E+06 |
| 54000 | 1.85E+07 | 340000 | 3.99E+06 |
| 55000 | 1.83E+07 | 350000 | 3.82E+06 |
| 56000 | 1.82E+07 | 360000 | 3.74E+06 |
| 57000 | 1.79E+07 | 370000 | 3.69E+06 |
| 58000 | 1.76E+07 | 380000 | 3.47E+06 |
| 59000 | 1.74E+07 | 390000 | 3.37E+06 |
| 60000 | 1.72E+07 | 400000 | 3.33E+06 |
| 61000 | 1.69E+07 | 410000 | 3.24E+06 |
| 62000 | 1.66E+07 | 420000 | 3.19E+06 |
| 63000 | 1.65E+07 | 430000 | 3.17E+06 |
| 64000 | 1.62E+07 | 440000 | 3.10E+06 |
| 65000 | 1.61E+07 | 450000 | 3.07E+06 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 66000 | 1.59E+07 | 460000 | 3.01E+06 |
| 67000 | 1.57E+07 | 470000 | 2.94E+06 |
| 68000 | 1.57E+07 | 480000 | 2.90E+06 |
| 69000 | 1.53E+07 | 490000 | 2.82E+06 |
| 70000 | 1.51E+07 | 500000 | 2.75E+06 |

E3. 2 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

| Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) | Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 | 2.40E+06 | 71000 | 747190 |
| 2000 | 2.07E+06 | 72000 | 741610 |
| 3000 | 1.90E+06 | 73000 | 735700 |
| 4000 | 1.82E+06 | 74000 | 730840 |
| 5000 | 1.83E+06 | 75000 | 726010 |
| 6000 | 1.65E+06 | 76000 | 721320 |
| 7000 | 1.61E+06 | 77000 | 716360 |
| 8000 | 1.57E+06 | 78000 | 711700 |
| 9000 | 1.54E+06 | 79000 | 707030 |
| 10000 | 1.50E+06 | 80000 | 702100 |
| 11000 | 1.66E+06 | 81000 | 697540 |
| 12000 | 1.50E+06 | 82000 | 692810 |
| 13000 | 1.59E+06 | 83000 | 688220 |
| 14000 | 1.39E+06 | 84000 | 684160 |
| 15000 | 1.36E+06 | 85000 | 679710 |
| 16000 | 1.35E+06 | 86000 | 675330 |
| 17000 | 1.32E+06 | 87000 | 671180 |
| 18000 | 1.30E+06 | 88000 | 666510 |
| 19000 | 1.28E+06 | 89000 | 661990 |

| | | | |
|-------|----------|--------|--------|
| 20000 | 1.26E+06 | 90000 | 657880 |
| 21000 | 1.25E+06 | 91000 | 652530 |
| 22000 | 1.23E+06 | 92000 | 649070 |
| 23000 | 1.21E+06 | 93000 | 645820 |
| 24000 | 1.19E+06 | 94000 | 642080 |
| 25000 | 1.17E+06 | 95000 | 638370 |
| 26000 | 1.16E+06 | 96000 | 634780 |
| 27000 | 1.14E+06 | 97000 | 630740 |
| 28000 | 1.13E+06 | 98000 | 627510 |
| 29000 | 1.11E+06 | 99000 | 622490 |
| 30000 | 1.10E+06 | 100000 | 619300 |
| 31000 | 1.09E+06 | 110000 | 581800 |
| 32000 | 1.06E+06 | 120000 | 549400 |
| 33000 | 1.05E+06 | 130000 | 520800 |
| 34000 | 1.04E+06 | 140000 | 495430 |
| 35000 | 1.03E+06 | 150000 | 472700 |
| 36000 | 1.02E+06 | 160000 | 452700 |
| 37000 | 1.01E+06 | 170000 | 434300 |
| 38000 | 1.00E+06 | 180000 | 417400 |
| 39000 | 992840 | 190000 | 402300 |
| 40000 | 982920 | 200000 | 388300 |
| 41000 | 974220 | 210000 | 375300 |
| 42000 | 957950 | 220000 | 363100 |
| 43000 | 948370 | 230000 | 351800 |
| 44000 | 939540 | 240000 | 341300 |
| 45000 | 929650 | 250000 | 331100 |
| 46000 | 919890 | 260000 | 322000 |
| 47000 | 910470 | 270000 | 313200 |
| 48000 | 902480 | 280000 | 305300 |

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 49000 | 894850 | 290000 | 297700 |
| 50000 | 886410 | 300000 | 290500 |
| 51000 | 878950 | 310000 | 283400 |
| 52000 | 870760 | 320000 | 277000 |
| 53000 | 863160 | 330000 | 271000 |
| 54000 | 855520 | 340000 | 264900 |
| 55000 | 848050 | 350000 | 259400 |
| 56000 | 840850 | 360000 | 254200 |
| 57000 | 834220 | 370000 | 249000 |
| 58000 | 827110 | 380000 | 244000 |
| 59000 | 820200 | 390000 | 239500 |
| 60000 | 812930 | 400000 | 235000 |
| 61000 | 808730 | 410000 | 230700 |
| 62000 | 798860 | 420000 | 226600 |
| 63000 | 792500 | 430000 | 222500 |
| 64000 | 785310 | 440000 | 219000 |
| 65000 | 779910 | 450000 | 214900 |
| 66000 | 773970 | 460000 | 211700 |
| 67000 | 768300 | 470000 | 209900 |
| 68000 | 763390 | 480000 | 205700 |
| 69000 | 757720 | 490000 | 202400 |
| 70000 | 752420 | 500000 | 200400 |

E4. 3 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900°C)

| Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) | Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 | 3.21E+07 | 71000 | 3.05E+06 |
| 2000 | 2.32E+07 | 72000 | 3.03E+06 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 3000 | 1.88E+07 | 73000 | 3.00E+06 |
| 4000 | 1.59E+07 | 74000 | 2.98E+06 |
| 5000 | 1.41E+07 | 75000 | 2.96E+06 |
| 6000 | 1.27E+07 | 76000 | 2.94E+06 |
| 7000 | 1.17E+07 | 77000 | 2.91E+06 |
| 8000 | 1.08E+07 | 78000 | 2.89E+06 |
| 9000 | 1.01E+07 | 79000 | 2.87E+06 |
| 10000 | 9.56E+06 | 80000 | 2.84E+06 |
| 11000 | 9.06E+06 | 81000 | 2.83E+06 |
| 12000 | 8.63E+06 | 82000 | 2.81E+06 |
| 13000 | 8.25E+06 | 83000 | 2.79E+06 |
| 14000 | 7.90E+06 | 84000 | 2.77E+06 |
| 15000 | 7.60E+06 | 85000 | 2.75E+06 |
| 16000 | 7.33E+06 | 86000 | 2.73E+06 |
| 17000 | 7.09E+06 | 87000 | 2.71E+06 |
| 18000 | 6.87E+06 | 88000 | 2.69E+06 |
| 19000 | 6.67E+06 | 89000 | 2.67E+06 |
| 20000 | 6.49E+06 | 90000 | 2.66E+06 |
| 21000 | 6.31E+06 | 91000 | 2.64E+06 |
| 22000 | 6.16E+06 | 92000 | 2.62E+06 |
| 23000 | 5.95E+06 | 93000 | 2.61E+06 |
| 24000 | 5.84E+06 | 94000 | 2.59E+06 |
| 25000 | 5.63E+06 | 95000 | 2.57E+06 |
| 26000 | 5.49E+06 | 96000 | 2.56E+06 |
| 27000 | 4.59E+06 | 97000 | 2.55E+06 |
| 28000 | 5.16E+06 | 98000 | 2.53E+06 |
| 29000 | 5.07E+06 | 99000 | 2.51E+06 |
| 30000 | 4.99E+06 | 100000 | 1.65E+06 |
| 31000 | 4.89E+06 | 110000 | 2.31E+06 |

| | | | |
|-------|----------|--------|----------|
| 32000 | 4.80E+06 | 120000 | 2.23E+06 |
| 33000 | 4.72E+06 | 130000 | 2.12E+06 |
| 34000 | 4.65E+06 | 140000 | 2.02E+06 |
| 35000 | 4.57E+06 | 150000 | 1.90E+06 |
| 36000 | 4.50E+06 | 160000 | 1.85E+06 |
| 37000 | 4.43E+06 | 170000 | 1.78E+06 |
| 38000 | 4.37E+06 | 180000 | 1.72E+06 |
| 39000 | 4.31E+06 | 190000 | 1.66E+06 |
| 40000 | 4.25E+06 | 200000 | 1.61E+06 |
| 41000 | 4.20E+06 | 210000 | 1.56E+06 |
| 42000 | 4.14E+06 | 220000 | 1.51E+06 |
| 43000 | 4.07E+06 | 230000 | 1.46E+06 |
| 44000 | 4.03E+06 | 240000 | 1.41E+06 |
| 45000 | 3.98E+06 | 250000 | 1.38E+06 |
| 46000 | 3.91E+06 | 260000 | 1.34E+06 |
| 47000 | 3.86E+06 | 270000 | 1.30E+06 |
| 48000 | 3.84E+06 | 280000 | 1.27E+06 |
| 49000 | 3.78E+06 | 290000 | 1.24E+06 |
| 50000 | 3.73E+06 | 300000 | 1.21E+06 |
| 51000 | 3.69E+06 | 310000 | 1.18E+06 |
| 52000 | 3.65E+06 | 320000 | 1.15E+06 |
| 53000 | 3.61E+06 | 330000 | 1.13E+06 |
| 54000 | 3.57E+06 | 340000 | 1.10E+06 |
| 55000 | 3.53E+06 | 350000 | 1.08E+06 |
| 56000 | 3.50E+06 | 360000 | 1.05E+06 |
| 57000 | 3.47E+06 | 370000 | 1.03E+06 |
| 58000 | 3.43E+06 | 380000 | 1.01E+06 |
| 59000 | 3.40E+06 | 390000 | 991100 |
| 60000 | 3.37E+06 | 400000 | 970800 |

| | | | |
|-------|----------|--------|--------|
| 61000 | 3.34E+06 | 410000 | 950000 |
| 62000 | 3.31E+06 | 420000 | 932900 |
| 63000 | 3.28E+06 | 430000 | 913900 |
| 64000 | 3.24E+06 | 440000 | 895600 |
| 65000 | 3.22E+06 | 450000 | 883600 |
| 66000 | 3.19E+06 | 460000 | 860100 |
| 67000 | 3.16E+06 | 470000 | 844800 |
| 68000 | 3.13E+06 | 480000 | 828500 |
| 69000 | 3.10E+06 | 490000 | 814500 |
| 70000 | 3.08E+06 | 500000 | 781500 |

E5. 4 at% Al-doped ZnO (Temperatur *Sintering* 900°C)

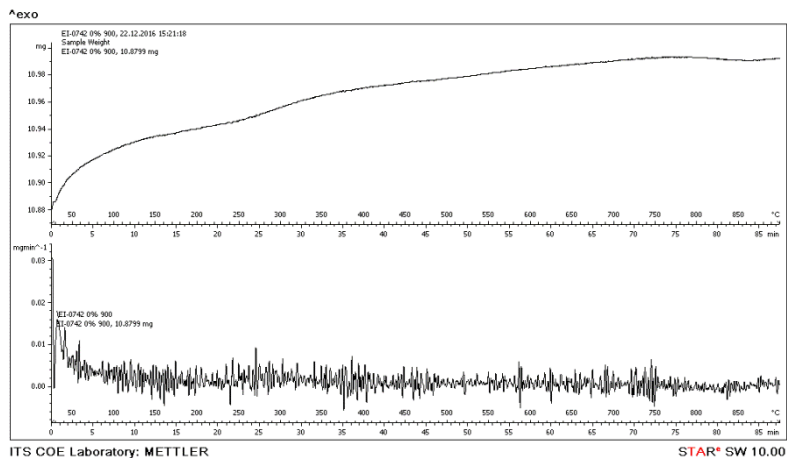
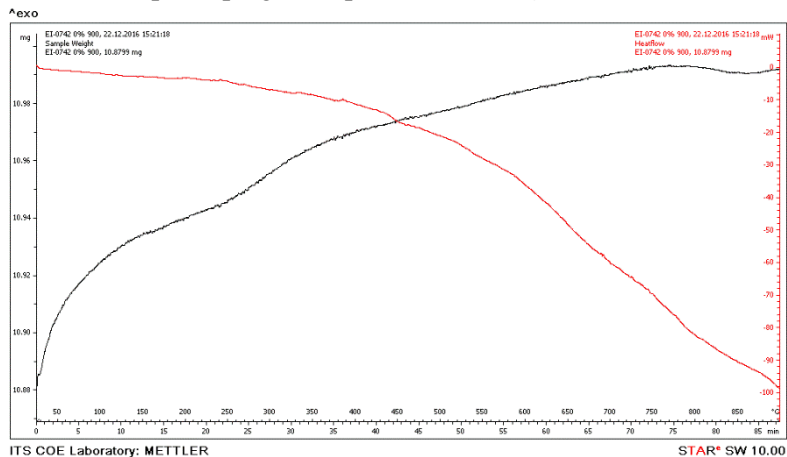
| Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) | Frekuensi (Hz) | Hambatan (Ohm) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 | 3.28E+06 | 71000 | 489880 |
| 2000 | 2.75E+06 | 72000 | 486380 |
| 3000 | 2.41E+06 | 73000 | 482420 |
| 4000 | 2.17E+06 | 74000 | 477720 |
| 5000 | 2.00E+06 | 75000 | 473200 |
| 6000 | 1.83E+06 | 76000 | 470910 |
| 7000 | 1.71E+06 | 77000 | 466810 |
| 8000 | 1.60E+06 | 78000 | 463240 |
| 9000 | 1.52E+06 | 79000 | 460100 |
| 10000 | 1.43E+06 | 80000 | 457440 |
| 11000 | 1.37E+06 | 81000 | 453530 |
| 12000 | 1.31E+06 | 82000 | 450350 |
| 13000 | 1.26E+06 | 83000 | 447880 |
| 14000 | 1.21E+06 | 84000 | 444680 |

| | | | |
|-------|----------|--------|--------|
| 15000 | 1.17E+06 | 85000 | 441710 |
| 16000 | 1.13E+06 | 86000 | 439420 |
| 17000 | 1.09E+06 | 87000 | 436720 |
| 18000 | 1.06E+06 | 88000 | 433760 |
| 19000 | 1.03E+06 | 89000 | 431750 |
| 20000 | 998270 | 90000 | 427000 |
| 21000 | 971250 | 91000 | 424940 |
| 22000 | 945670 | 92000 | 421760 |
| 23000 | 924020 | 93000 | 419830 |
| 24000 | 906490 | 94000 | 417350 |
| 25000 | 881200 | 95000 | 414840 |
| 26000 | 863190 | 96000 | 412170 |
| 27000 | 847110 | 97000 | 408410 |
| 28000 | 830390 | 98000 | 405610 |
| 29000 | 814920 | 99000 | 402090 |
| 30000 | 800760 | 100000 | 400130 |
| 31000 | 785840 | 110000 | 379270 |
| 32000 | 770880 | 120000 | 361410 |
| 33000 | 756980 | 130000 | 345650 |
| 34000 | 743070 | 140000 | 331580 |
| 35000 | 725170 | 150000 | 318900 |
| 36000 | 713850 | 160000 | 307700 |
| 37000 | 703180 | 170000 | 297700 |
| 38000 | 694690 | 180000 | 287900 |
| 39000 | 685700 | 190000 | 278800 |
| 40000 | 673350 | 200000 | 271300 |
| 41000 | 665910 | 210000 | 264300 |
| 42000 | 657160 | 220000 | 257100 |
| 43000 | 648960 | 230000 | 250500 |

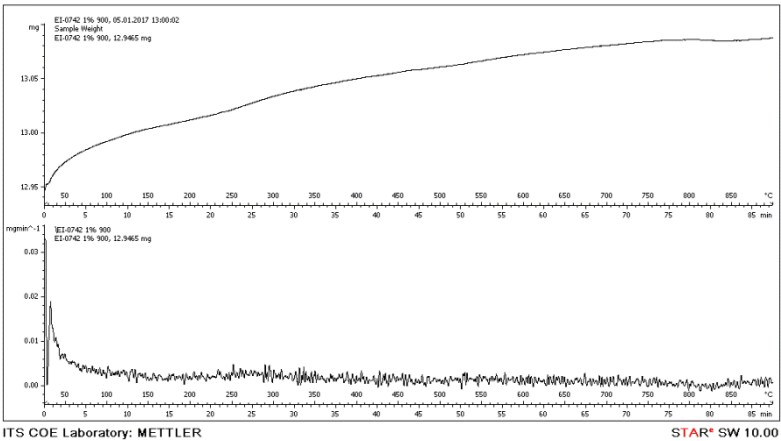
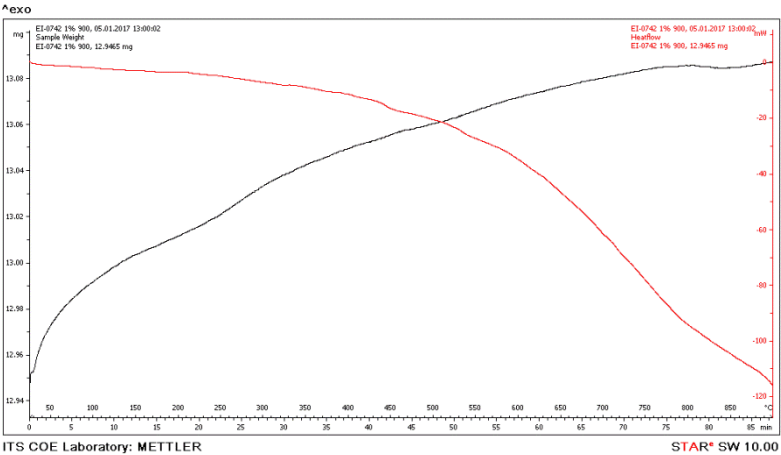
| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| 44000 | 641710 | 240000 | 244000 |
| 45000 | 634480 | 250000 | 238400 |
| 46000 | 627940 | 260000 | 233000 |
| 47000 | 620420 | 270000 | 228200 |
| 48000 | 613430 | 280000 | 223600 |
| 49000 | 610310 | 290000 | 219100 |
| 50000 | 601920 | 300000 | 214900 |
| 51000 | 587850 | 310000 | 210800 |
| 52000 | 579300 | 320000 | 206900 |
| 53000 | 573380 | 330000 | 203200 |
| 54000 | 568220 | 340000 | 199800 |
| 55000 | 562950 | 350000 | 196600 |
| 56000 | 557660 | 360000 | 193600 |
| 57000 | 551930 | 370000 | 190700 |
| 58000 | 545280 | 380000 | 187800 |
| 59000 | 540150 | 390000 | 184800 |
| 60000 | 533690 | 400000 | 182100 |
| 61000 | 529680 | 410000 | 179600 |
| 62000 | 525500 | 420000 | 177100 |
| 63000 | 520560 | 430000 | 174700 |
| 64000 | 516030 | 440000 | 172500 |
| 65000 | 513040 | 450000 | 170200 |
| 66000 | 507980 | 460000 | 168000 |
| 67000 | 503380 | 470000 | 166000 |
| 68000 | 500010 | 480000 | 164100 |
| 69000 | 497600 | 490000 | 161900 |
| 70000 | 493630 | 500000 | 160200 |

Lampiran F: Hasil Uji DSC/TGA dan DTG

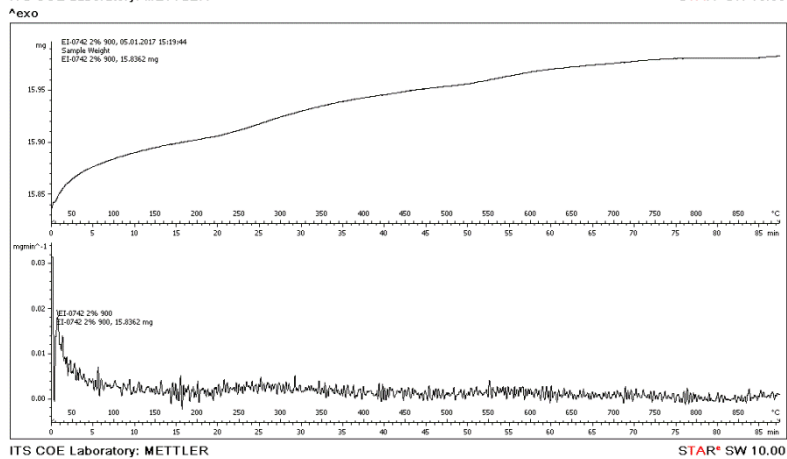
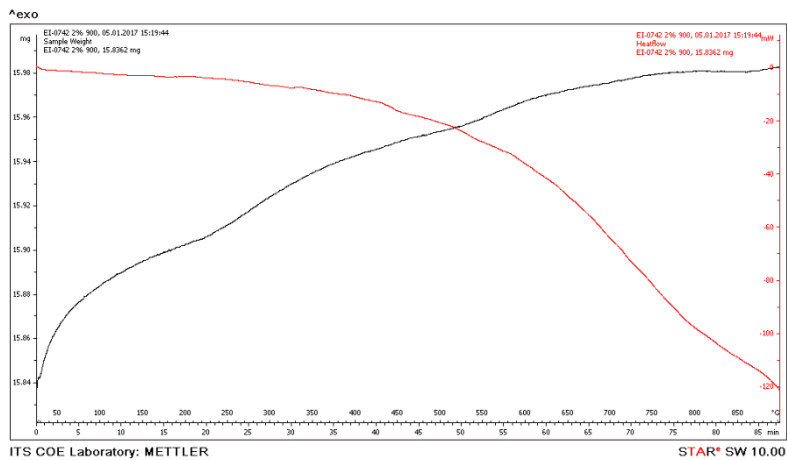
F1. ZnO tanpa Doping (Temperatur Sintering 900° C)



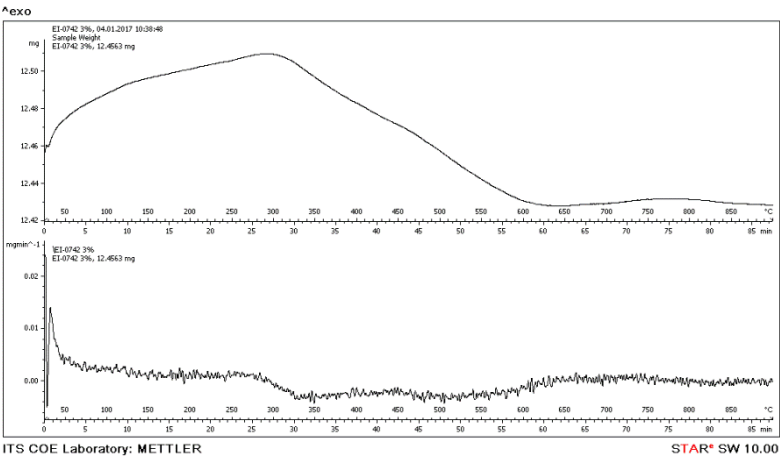
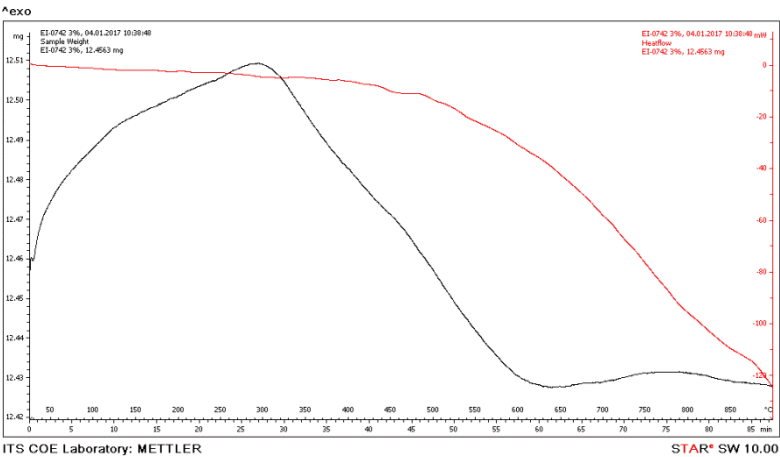
F2. 1 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900° C)



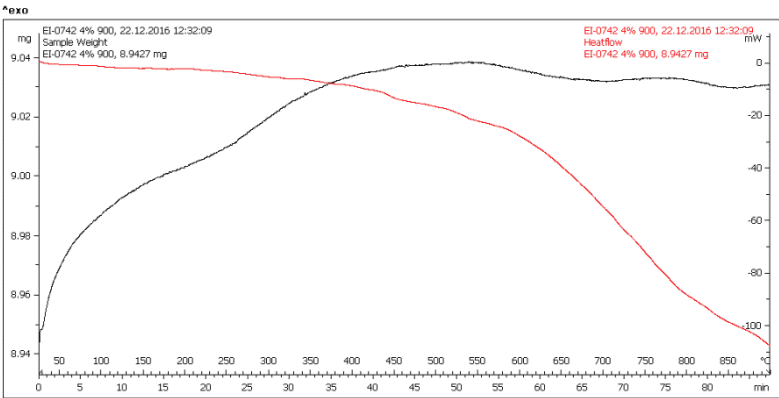
F3. 2 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900° C)



F4. 3 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900° C)

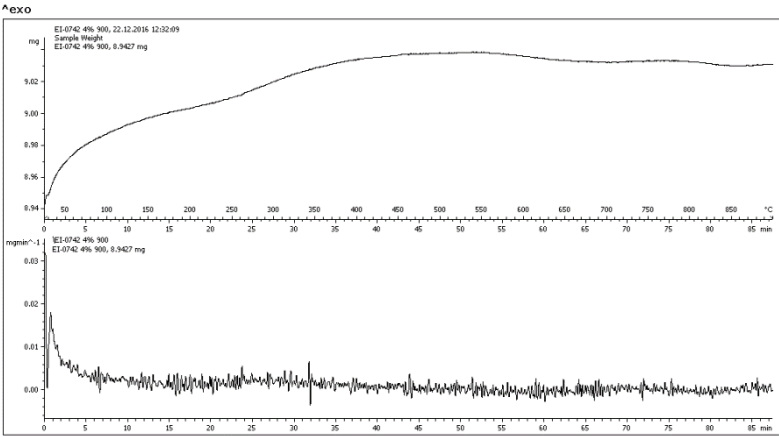


F5. 4 at% Al-doped ZnO (Temperatur Sintering 900° C)



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00



ITS COE Laboratory: METTLER

STAR® SW 10.00

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Ilham Ramadhan Putra yang lahir di Bojonegoro pada tanggal 12 Februari 1996. Penulis merupakan putra pertama dari enam bersaudara pasangan bapak Budi Karsono dan ibu Nur Janah. Penulis menempuh pendidikan formal di Surabaya dan Bojonegoro, yakni TK Sartika Ketintang Surabaya, SD Negeri Kepatihan Bojonegoro, SMP Negeri 1 Bojonegoro, dan SMA Negeri 1 Bojonegoro. Pada tahun 2013, penulis lulus dari SMA dan melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Selama berkuliah, penulis aktif berorganisasi antara lain di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS, Forum Bocah Bojonegoro ITS-PENS-PPNS, Kepemanduan LKMM ITS, dan Komunitas 1000 Guru Surabaya. Selain itu, pada tahun ketiga, penulis mendapatkan beasiswa dari Djarum Foundation. Dalam bidang organisasi, penulis aktif menjadi staf departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI-ITS 2014/2015, ketua umum Forum Bocah Bojonegoro ITS-PENS-PPNS 2014/2015, dan Kepala Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI-ITS 2015/2016. Penulis sempat melaksanakan kerja praktik di Owens-Illinois Inc. Jakarta *Plant*. Sejak tahun kedua hingga keempat penulis aktif sebagai Pemandu LKMM Pra-TD dan TD di ITS. Penulis menutup kuliah di ITS dengan Tugas Akhir berjudul **“PENGARUH PENAMBAHAN Al_2O_3 TERHADAP SIFAT LISTRIK DAN TERMAL $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Al}_x\text{O}$ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL TERMOELEKTRIK”**.

Email: ilham.ramaputra@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat, karunia, kemudahan, dan kelancaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ayah, Ibu, adik-adik penulis, Didin, Didil, Berlin, Aal, serta Qilla, atas doa, dukungan, dan pengertian yang diberikan selama ini.
3. Keluarga di Surabaya, terutama Mbah Kakung dan mbak Nurul yang selalu memberikan dukungan baik nasehat maupun finansial dan doa kepada penulis.
4. Ibu Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. dan Ibu Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu memberikan saran, masukan, bimbingan, dukungan, dan motivasi kepada penulis.
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama berkuliah di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
6. Ibu Dian Mughni F., S.T., M.Sc., selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi untuk menjadi lebih baik di setiap semester.
7. Seluruh dosen dan civitas akademik Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS, yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat serta pengalaman selama berkuliah di jurusan ini.
8. Partner Tugas Akhir, Amelthia Rahel dan Nurul Lailatul Muzayadah, yang selalu memberikan semangat, motivasi, membagikan ilmu, serta suka duka selama mengerjakan Tugas Akhir.
9. Mbak Iis, yang dengan sabar membantu penulis dan partner Tugas Akhir penulis dalam melakukan berbagai pengujian sampel dan karakterisasi sampel.

10. Mas Ridha, Pak Soleh, dan Mbak Vita yang telah membagikan ilmu dan pengalaman kepada penulis serta membantu penulis dalam membuat dan menguji sampel.
11. Sahabat-sahabat terbaik, Saling Berbagi *team*: Imbang, Iqbal, Fiqhi, Qory, dan Hana, yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi, nasehat, dan bantuan kepada penulis.
12. Teman-teman Laboratorium Fisika Material yang selalu berbagi ilmu dan suka duka bersama penulis dalam proses mengerjakan Tugas Akhir.
13. Teman-teman MT15 yang selalu ada ketika penulis membutuhkan bantuan selama berkuliah di jurusan ini.
14. Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI ITS periode 2014/2015 dan 2015/2016 yang telah memberikan banyak pengalaman, suka duka, dan pembelajaran dalam berorganisasi.
15. Teman-teman BPH dan PI HMMT 2015/2016, yang selalu menemani penulis dalam mengarungi lautan perjuangan untuk menjadi pribadi yang lebih bermanfaat.
16. Brotherhood 31 Beswan Djarum Surabaya 2015/2016 yang selalu memberikan support dan semangat kepada penulis.
17. Pemandu KOMPAS FTI ITS yang selalu memberikan semangat dan motivasi kepada penulis untuk menjadi pribadi yang lebih baik.
18. Tim 1000 Guru Surabaya, yang selalu memberikan semangat untuk selalu berbagi dengan sesama.
19. Seluruh rekan dan kawan penulis dimanapun berada.

Semoga, Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat untuk para pembaca dan dapat melengkapi referensi terkait pengetahuan akan material termoelektrik.

Surabaya, 17 Januari 2017

Ilham Ramadhan Putra